



TUGAS AKHIR - TM 095502

**ANALISIS UNJUK KERJA SIKLUS RANKINE SEBELUM
DAN SESUDAH OVERHAUL PADA PLTU UNIT 2 PT. PJB
UP GRESIK**

**ANITA VIZENZA FN
NRP 2114 030 094**

**Dosen Pembimbing
Ir. Joko Sarsetiyanto, MT
NIP 19610602 198701 1 001**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



TUGAS AKHIR - TM 095502

**ANALISIS UNJUK KERJA SIKLUS RANKINE SEBELUM
DAN SESUDAH OVERHAUL PADA PLTU UNIT 2 PT. PJB
UP GRESIK**

ANITA VIZENZA FN
NRP 2114 030 094

Dosen Pembimbing
Ir. Joko Sarsetiyanto, MT
NIP 19610602 198701 1 001

PROGRAM STUDI DIPLOMA III
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TM 095502

**PERFORMANCE ANALYSIS RANKINE CYCLE BEFORE
AFTER OVERHAUL AT PLTU UNIT 2 PT. PJB UP GRESIK**

ANITA VIZENZA FN
NRP 2114 030 094

Counsellor Lecturer
Ir. Joko Sarsetiyanto, MT
NIP 19610602 198701 1 001

DIPLOMA III MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Vocation
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS UNJUK KERJA SIKLUS RANKINE SEBELUM DAN SESUDAH OVERHAUL PADA PLTU UNIT 2 PT. PJB UP GRESIK

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar

Ahli Madya

Pada

Bidang Studi Konversi Energi

Program Studi Diploma III Departemen Teknik Mesin Industri

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ANITA VIZENZA FN

NRP. 2114 030 094

Mengetahui,

Pembimbing



Ir. Joko Sarsetiyanto, MT
NIP. 196106021987011001

**SURABAYA,
JULI 2017**

ANALISIS UNJUK KERJA SIKLUS RANKINE SEBELUM DAN SESUDAH OVERHAUL PADA PLTU UNIT 2 PT. PJB UP GRESIK

Nama Mahasiswa : Anita Vizenza Fitri Nurshanti
NRP : 2114 030 094
Jurusan : Departemen Teknik Mesin Industri
Dosen Pembimbing : Ir. Joko Sarsetiyanto, MT

Abstrak

Sistem Pembangkit Daya beroperasi berdasarkan siklus rankine. Setelah beroperasi beberapa lama pasti akan mengalami penurunan kinerja. Oleh karena itu akan dilakukan perhitungan unjuk kerja dengan membandingkan antara unjuk kerjanya sebelum dan sesudah overhaul.

Untuk mengetahui unjuk kerja siklus rankine dapat dilakukan analisis thermodinamika menggunakan data sheet sebelum dan sesudah overhaul.

Hasil analisis thermodinamika dapat disimpulkan bahwa pada PLTU unit 2 PT.PJB UP Gresik menunjukkan bahwa sebelum dilakukan overhaul efisiensi isentropik siklus sebesar 29% dan setelah dilakukan overhaul efisiensi isentropik siklus sebesar 30%. Jadi ada kenaikan efisiensi isentropik sebesar 1% sehingga memiliki unjuk kerja yang baik.

Kata Kunci: Unjuk Kerja, Overhaul, Efisiensi.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

PERFORMANCE ANALYSIS RANKINE CYCLE BEFORE AFTER OVERHAUL AT PLTU UNIT 2 PT. PJB UP GRESIK

Name : Anita Vizenza FN
NRP : 2114 030 094
Departemet : Departemen Teknik Mesin Industri
Counsellor Lecturer : Ir. Joko Sarsetiyanto, MT

Abstract

Power Generating Systems operate on a rankine cycle. After a long operation will definitely experience a decrease in performance. Therefore, performance calculations will be performed by comparing the performance before and after the overhaul.

Knowing the performance of rankine cycle can be done thermodynamic analysis using data sheet before and after overhaul.

The result of thermodynamic analysis can be concluded that in PLTU unit 2 PT.PJB UP Gresik shows that prior to overhaul isentropic efficiency cycle is 29% and after overhaul isentropic cycle efficiency is 30%. So there is an increase of isentropic efficiency by 1% so it has a good performance.

Keywords: Performance, Overhaul, Efficiency.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan karunia, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul: **ANALISIS UNJUK KERJA SIKLUS RANKINE SEBELUM DAN SESUDAH OVERHAUL PADA PLTU UNIT 2 PT. PJB UP GRESIK.**

Tersusunnya Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan dan kerja sama yang baik dari semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung terlibat di dalam Tugas Akhir ini. Oleh karena itu pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Joko Sarsetiyanto, MT selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberi saran, bimbingan dan ilmu yang bermanfaat sehingga penulis mampu menyelesaikan pengerjaan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT selaku Ketua Program Studi Diploma III Teknik Mesin Industri.
3. Bapak Ir.Suhariyanto, MSc selaku koordinator tugas akhir Program Studi Diploma III Teknik Mesin Industri.
4. Bapak Hendro Nurhadi, Dipl.ing.PhD selaku dosen wali yang telah membimbing selama perkuliahan.
5. Bapak / Ibu dosen dan seluruh karyawan Program Studi Diploma III Teknik Mesin Industri yang telah banyak membimbing dan membantu selama perkuliahan.
6. Bapak Fuad Imam Suyoto, Bapak Ali, Mas Bahtiar, Bapak-Bapak operator CCR PLTU, Bapak-Bapak HAR Mesin PLTU, Bapak-Bapak Rendal OP PLTU, Bapak-Bapak Knowledge Center, dan seluruh staff operasi PLTU Unit 2 PT. PJB UP Gresik. Terima kasih atas bantuan, data, ilmu, dan bimbingan yang telah diberikan sehingga penulis dapat terbantu untuk penyelesaian tugas akhir.

7. Ayah, Ibu dan serta seluruh keluarga penulis yang telah memberi dukungan serta doa yang baik.
8. Haryo Febrianto , Muhammad Nafi' , Rizal Fawzi , Nadia Parwaty serta seluruh teman-teman yang telah membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini
9. Untuk teman- teman satu atap yang selalu menjadi *moodboster* saat lelah dan lapar(Tiara, Ninik, Revina, Farida).
10. Untuk Achmad Sochibul B yang selalu memberi semangat dan dukungan penuh.
11. Teman seperjuangan TA, dan untuk saudara mahasiswa D3MITS.
12. Serta berbagai pihak yang belum tertulis, tetapi sangat berarti dalam penyelesaian tugas akhir.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Allah SWT.

Tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, penulis berharap Tugas Akhir ini dapat terus dikembangkan dan disempurnakan lebih lanjut.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL (Versi bahasa Indonesia)	i
HALAMAN JUDUL (Versi bahasa Inggris)	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Maksud dan Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 7
2.1. Pendahuluan	7
2.2. Peralatan-Peralatan Pembangkit Listrik Tenaga Uap	8
2.2.1. Boiler	8
2.2.2. Turbin Uap	10
2.2.3. Kondensor	12
2.2.4. Pompa	13
2.2.5. Deaerator	14
2.3. Tinjauan Termodinamika	15
2.3.1. Hukum Pertama Termodinamika Untuk Control Volume	15
2.3.2. Hukum Kedua Termodinamika	23

2.3.3. Konsep Irreversibilitas pada PLTU	25
2.4 Siklus Rankine pada Turbin Uap PLTU.....	26
2.4.1 Siklus Rankine Ideal	26
2.4.2 Siklus Rankine Aktual PLTU.....	28
2.4.3 Evaluasi Kerja dan Energy Kalor pada Siklus Aktual	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1. Flow Chart Penelitian	35
3.2. Diagram Alir Penelitian	35
3.3. Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir	36
3.4. Spesifikasi Alat di PLTU Blok 2.....	36
BAB IV PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN	49
4.1. Data Yang Digunakan.....	49
4.2. Perhitungan Unjuk Kerja Siklus Rankine Unit 2 Sebelum Overhaul	49
4.2.1. Perhitungan Properties Pada Cek Point.....	49
4.2.2. Blok Diagram PLTU Unit 2	50
4.2.3 Perhitungan Laju Aliran Massa.....	56
4.2.3. Data Harga Entalpi Masing-Masing Cek Poin Sesudah Overhaul	61
4.2.4 Perhitungan Effisiensi Isentropis	66
4.2.5 Perhitungan Daya Turbin	58
4.2.6 Perhitungan Kerja Pompa	59
4.2.7 Perhitungan Panas Yang Masuk	59
4.2.8 Perhitungan Effisiensi Thermal dan Heat Rate	59
4.2.9 Hasil Perhitungan Unjuk Kerja Sebelum dan Sesudah Overhaul	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1. Kesimpulan	69

5.2. Saran	69
------------------	----

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Skema Pusat PLTU	2
Gambar 2.2 Boiler	8
Gambar 2.3 Turbin Uap.....	11
Gambar 2.4 Kondensor	12
Gambar 2.5 Boiler Feed Pump.....	13
Gambar 2.6 Deaerator	14
Gambar 2.7 <i>Control Volume</i> Konservaasi Massa	16
Gambar 2.8 <i>Control Volume</i> Konservasi Massa dan Energi...17	
Gambar 2.9 T-S Diagram Perubahan Entropi.....	22
Gambar 2.10 Ilustrasi Pernyataan Clausius	23
Gambar 2.11 Ilustrasi Pernyataan Kelvin-Planck	24
Gambar 2.12 Blok Diagram Siklus Rankine Ideal	26
Gambar 2.13 Blok Diagram Silus Rankine Aktual	29
Gambar 2.14 T-S Diagram Silus Rankine Aktual.....	29
Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir	33
Gambar 3.2 Boiler Unit 2 PT.PJB UP Gresik.....	37
Gambar 3.3 Steam Turbin dan Generator Unit 2	39
Gambar 3.4 Condenser Unit 1 dan 2	40
Gambar 3.5 Condensate Pump Unit 1 dan 2.....	42
Gambar 3.6 Deaerator Unit 2.....	43
Gambar 3.7 Boiler Feed Pump Unit 1 dan 2.....	44
Gambar 3.8 High Pressure Heater Unit 2	46
Gambar 3.9 Low Pressure Heater Unit 2	47
Gambar 4.1 Blok Diagram PLTU Unit 2.....	50
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Kerja Turbin.....	65
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Eff Thermal.....	66
Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Heat Rate	67

DAFTAR TABEL

Tabel 4.2.8 Hasil Perhitungan Isentropis Sebelum dan Sesudah OH	61
Tabel 4.2.9 Hasil Perhitungan Effisiensi Isentropis	62
Tabel 4.2.10 Hasil Perhitungan Unjuk Kerja Sebelum dan Sesudah Overhaul	62

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Di Indonesia, energi listrik merupakan suatu energi yang sangat dibutuhkan oleh semua kalangan baik rumah tangga maupun perusahaan. Listrik juga menjadi kebutuhan penting bagi masyarakat umum. Dalam hal ini, energi listrik di Indonesia dikelola oleh negara melalui Badan Usaha Milik Negara (BUMN), yakni PT. PLN (Persero). PT. PLN (Persero) merupakan produsen listrik terbesar di Indonesia khususnya pada bidang/unit pembangkitan. PT. PLN (Persero) memiliki anak perusahaan, salah satunya adalah PT. PJB UP Gresik. Perusahaan ini bergerak dalam bisnis pembangkitan untuk melayani kebutuhan energi listrik area Jawa, Madura, dan Bali (JAMALI). Area pembangkitan listrik yang dimiliki oleh PT. PJB UP Gresik terdiri dari 3 blok unit PLTGU, 4 unit PLTU, dan 2 unit PLTG. PLTU adalah suatu pembangkit listrik dimana energi listrik dihasilkan oleh generator yang diputar oleh turbin uap yang memanfaatkan tekanan uap hasil dari penguapan air yang dipanaskan oleh bahan bakar di dalam ruang bakar (boiler).

Seiring dengan meningkatnya permintaan energi listrik, menuntut perusahaan penyedia listrik khususnya PT. PJB UP Gresik untuk terus melakukan optimalisasi serta menjaga kualitas mesin-mesin pembangkitnya. Beberapa diantaranya dengan cara melakukan inspeksi harian, perawatan berkala, serta dilakukannya Overhaul. PLTGU yang merupakan salah satu unit pada PT. PJB UP Gresik ini juga tidak lepas dari jangkauan optimalisasi tersebut. PLTGU merupakan unit pembangkitan yang menggabungkan antara PLTG dengan PLTU. Berkaitan dengan kehandalan dalam menghasilkan energi listrik, 4 unit PLTU PT. PJB UP Gresik telah mengalami modifikasi boiler pada tahun 1994 sampai sekarang unit tersebut dapat beroperasi dengan menggunakan bahan bakar *CNG (Compressed Natural Gas)*. *CNG* dibuat dengan melakukan kompresi metana (CH_4) yang

diekstrak dari gas alam. Bahan bakar tersebut secara langsung berasal dari daerah gas. Satu-satunya proses yang kadang-kadang perlu dilakukan, adalah menyaring gas terlebih dahulu. Tapi biasanya, gas dapat langsung digunakan sebagai bahan bakar setelah proses kompresi. Bahan bakar CNG dianggap lebih 'bersih' bila dibandingkan dengan dua bahan bakar minyak karena emisi gas buangnya yang ramah lingkungan. Ini salah satu upaya untuk mendukung penghematan energi.



Gambar 1.1 Skema Pusat PLTU PT.PJB UP Gresik

Berhubungan mengenai penghematan energi pada PLTU, tentunya berkaitan dengan unjuk kerja siklus Rankine unit PLTU. Parameter unjuk kerja siklus Rankine PLTU yang dilihat adalah Efisiensi thermal dan Heat Rate. Sehingga untuk mengetahui unjuk kerja unit dapat dilihat dari Efisiensi thermal dan Heat Rate siklus Rankine operasinya kemudian dibandingkan dengan Efisiensi thermal dan Heat Rate siklus Rankine operasi spesifikasinya. Dari perbandingan tersebut dapat diketahui penghematan energi untuk operasi PLTU.

Oleh karena itu, pada tugas akhir ini penulis akan melakukan perbandingan unjuk kerja siklus Rankine PLTU blok 2 PT. PJB UP Gresik pada beban generator dengan keadaan operasi spesifikasi dan operasinya sekarang. Adapun unit yang diambil untuk perhitungan adalah PLTU Unit 2 (100 MW) di PT. PJB UP Gresik. Kemudian untuk mengetahui penghematan biaya operasi, penulis akan melakukan perhitungan penggunaan variasi bahan bakar mana yang optimum dari segi biaya konsumsi bahan bakar untuk mensuplai kalor ke boiler PLTU unit 2 pada beberapa beban operasi generator sekarang yang dihitung unjuk kerjanya. Perhitungan variasi bahan bakar akan di tinjau dari specific fuels consumption, dan biaya konsumsi bahan bakar tiap kerja yang dihasilkan.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang terdapat pada tugas akhir ini yaitu bagaimana performa siklus Rankine pada PLTU blok 2 PT. PJB UP Gresik saat sebelum dan sesudah dilakukan Overhaul (OH), dengan menggunakan indikator heat rate, daya turbin, dan efisiensi siklus.

1.3. Maksud dan Tujuan

Penulis tugas akhir ini membahas tentang bagaimana performa siklus rankine pada PLTU blok 2 PT. PJB UP Gresik saat sebelum dan sesudah dilakukan Overhaul (OH).

Untuk mengetahui performa siklus Rankine pada Blok 2 PLTU UP Gresik saat sebelum dan sesudah dilakukan Overhaul.

1.4. Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas tidak terlalu meluas, maka diberikan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Data didapat dari hasil rekapitulasi operasi yang direkap oleh Rendal OP PT. PJB UP Gresik untuk PLTU Unit 2 pada tanggal 29 Maret 2016 sebelum overhaul, tanggal 29

Juni 2016 sesudah overhaul, dan Mass & Heat Balance PLTU unit 2.

2. Data unjuk kerja beberapa komponen unit didapat dari data performance test PLTU Unit 2.
3. Perhitungan unjuk kerja siklus rankine didasarkan pada analisis termodinamika dengan beberapa asumsi.
4. Data-data lain yang diperlukan dalam analisis dan perhitungan diambil sesuai dengan literatur yang relevan.

1.5. Manfaat Penelitian

Adaun manfaat yang dapat diperoleh dari penulis Tugas Akhir itu sendiri adalah:

1. Menambah pengetahuan dan wawasan mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Uap khususnya dalam bidang turbin uap.
2. Sebagai bahan masukan bagi para pembaca khususnya mahasiswa Program Studi D3 Teknik Mesin Konversi Energi yang membahas masalah dan topik yang sama.
3. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi bagian operasi PLTU Unit 2 PT. PJB UP Gresik dalam memberikan kebijakan maintenance & operasi sehingga didapat unjuk kerja operasi unit yang baik.

1.6. Sistematika penulisan

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini terbagi menjadi beberapa bab yaitu sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Bab ini menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, maksud dan tujuan, batasan masalah, manfaat penelitian serta sistematika penulisan.

Bab II Dasar teori

Bab ini berisi teori-teori dari berbagai referensi yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam melakukan perhitungan dan analisis termodinamika.

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini terdiri dari tahapan yang digunakan dalam melaksanakan penelitian dan penyusunan tugas akhir.

Bab IV Perhitungan dan Pembahasan

Bab ini terdiri dari tahapan perhitungan unjuk kerja Siklus Rankine unit dan efisiensi dengan analisis termodinamika dan perbandingannya sebelum overhaul dan sesudah overhaul.

Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil perhitungan, perbandingan dan pembahasan yang telah dilakukan dan saran untuk operasi dan maintenance unit serta penelitian selanjutnya.

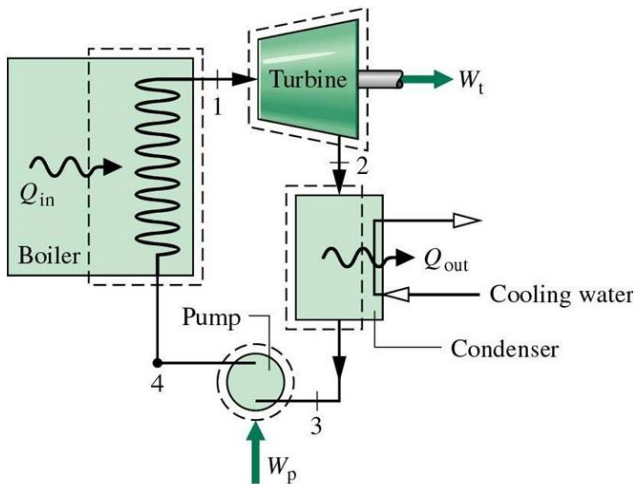
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pendahuluan

Sebuah system pembangkit tenaga uap sederhana sebenarnya hasil penyederhanaan dari pembangkit tenaga uap sebenarnya. Salah satu tujuan penyederhanaan system pembangkit tenaga uap adalah memudahkan evaluasi kinerja pembangkit, baik tiap system pembangkit secara keseluruhan maupun bagian-bagian peralatan dari system keseluruhan. Pada gambar 2.1 sistem pembangkitan tenaga uap dibagi menjadi 4 subsistem yang terdiri dari beberapa peralatan.



Gambar 2.1 Siklus Pembangkit Tenaga Uap

Secara singkat tiap sub-sistem terbagi dikarenakan jenis konversi energinya, pada sus-sistem A terjadi konversi energy dari panas ke kerja, pada sub-sistem B terjadiproses perubahan air menjadi uap dengan sumber energy dari proses pembakaran bahan bakar yang digunakan dan udara, pada sub-sistem C terjadi

proses penurunan suhu air dengan memanfaatkan perbedaan temperatur antara lingkungan dan system dan terakhir pada sub-sistem D terjadi konversi energy dari kerja menjadi listrik. Sub-sistem A merupakan bagian utama dari sebuah system pembangkit tenaga uap, dimana pada sub-sistem ini tiap unit massa secara periodik melewati siklus termodinamika pada keempat komponen utama system pembangkit tenaga uap keempat komponen utama yang dimaksud adalah boiler, turbin uap, kondensor dan pompa. Fungsi utama boiler adalah tempat pembakaran bahan bakar sehingga air yang masuk ke boiler dipanaskan menjadi uap. Fungsi utama dari turbin uap adalah mengkonversi tekanan uap menjadi gerakan memutar yang terjadi karena tekanan uap yang ada menekan sudu turbin. Fungsi utama dari kondensor adalah merubah uap keluaran turbin uap menjadi air sehingga bisa dipompakan oleh pompa. Fungsi utama pompa adalah mengalirkan air ke dalam boiler.

2.2 Peralatan peralatan Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Adapun komponen utama dari PLTU adalah sebagai berikut

2.2.1 Boiler (Ketel Uap)

Boiler atau ketel uap adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada didalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontinyu didalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar.

Uap yang dihasilkan boiler adalah uap *superheat* dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. Boiler yang

konstruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut dengan water tube boiler.

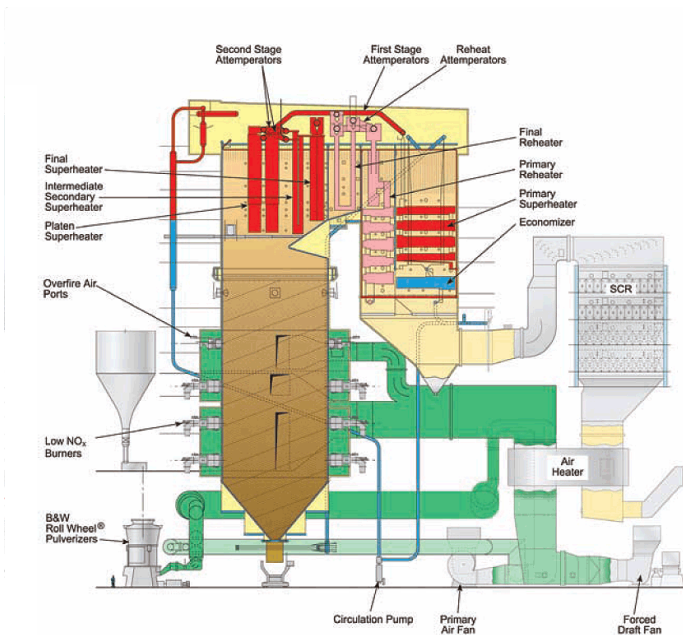
Pada unit pembangkit, boiler juga biasa disebut dengan steam generator (pembangkit uap) mengingat arti kata boiler hanya pendidih, sementara pada kenyataannya dari boiler dihasilkan uap superheat bertekanan tinggi. Dalam pengoperasiannya, boiler ditunjang oleh beberapa peralatan seperti ruang bakar, dinding pipa, burner dan cerobong.

Secara umum boiler dibagi kedalam dua jenis yaitu : boiler pipa api (Fire tube boiler) dan boiler pipa air (water tube boiler). Pada boiler pipa api proses pengapian terjadi didalam pipa, kemudian panas yang dihasilkan dihantarkan langsung kedalam boiler yang berisi air. Besar dan konstruksi boiler mempengaruhi kapasitas dan tekanan yang dihasilkan boiler tersebut. Sedangkan pada boiler pipa air proses pengapian terjadi diluar pipa, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa yang berisi air dan sebelumnya air tersebut dikondisikan terlebih dahulu melalui economizer, kemudian steam yang dihasilkan terlebih dahulu dikumpulkan di dalam sebuah steam-drum. Sampai tekanan dan temperatur sesuai, melalui tahap secondary superheater dan primary superheater baru steam dilepaskan ke pipa utama distribusi. Didalam pipa air, air yang mengalir harus dikondisikan terhadap mineral atau kandungan lainnya yang larut di dalam air tersebut. Hal ini merupakan faktor utama yang harus diperhatikan terhadap tipe ini.

Secara umum fungsi dari tiap komponen adalah sebagai berikut :

- Furnace : komponen ini merupakan tempat pembakaran bahan bakar. Beberapa bagian dari furnace diantaranya burner, windbox, dan exhaust for flue gas.

- Steam drum : komponen ini merupakan tempat penampungan air panas dan steam yang telah dibangkitkan. Steam masih berifat jenuh (saturated steam).
- Superheater : superheater merupakan kumpulan pipa boiler yang terletak di jalan aliran gas panas hasil pembakaran. Panas dari gas ini dipindahkan ke saturated steam yang ada dalam pipa superheater, sehingga berubah menjadi superheated steam.
- Air heater : komponen ini merupakan ruang pemanas yang digunakan untuk memanaskan udara luar yang diserap untuk meminimalisasi udara yang lembab yang akan masuk windbox selanjutnya digunakan untuk pembakaran. Udara luar ini dipanaskan dengan sisa hasil panas (flue gas) yang dihasilkan pembakaran di furnace.
- Economizer : komponen ini merupakan ruang pemanas yang digunakan untuk memanaskan air dan air yang terkondensasi dari system sebelumnya, maupun air umpan baru.



Gambar 2.2 Boiler

2.2.2 Turbin Uap

Turbin merupakan peralatan yang mengkonversi energi panas pada uap bertekanan tinggi untuk memutar poros yang menuju generator. Dengan adanya energi kinetis uap yang digunakan langsung untuk memutar turbin, maka dapat dikatakan juga disini, bahwa kemajuan teknologi turbin banyak dipengaruhi oleh kondisi uap yang dihasilkan. Tujuan yang ingin dicapai oleh teknologi turbin adalah mengambil manfaat sebesar-besarnya dari energi fluida kerja yang tersedia, mengubahnya menjadi energi mekanis dengan efisiensi maksimum.

Berikut adalah bagian – bagian utama dari turbin uap:

➤ Rotor Turbin

Secara umum turbin mempunyai hubungan dengan putaran, maka tentunya ada bagian yang berputar atau biasa disebut Rotor. Rotor terdiri dari beberapa sudu yang diserut/diikat sehingga membentuk seperti lingkaran danditengah-tengahnya ada poros untuk tempat kedudukan untuk sudu-sudu tadi, sehingga membentuk menyerupai kincir. Rotor Turbin ini terdiri dari kumpulan beba sudu terikat dan ditata secara bertingkat dari mulai terkecil sampai yang terbesar.

➤ Stator Turbin

Pada Turbin dan sudu antar dan sudu jalan, dan kumpulan dari beberapa sudu tetap inilah yang dinakan stator turbin. Adapun letaknya diantara sudu jalan sedang ditingkat awal/pertama disebut nozzle, dan bentuknya mirip dengan sudu tetap.

➤ Casing Turbin (Rumah Trubin)

Rumah Turbin adalah cover atau tutup sudu putar dan sudu tetap, sehingga terjadi gerak turbin ketika dialiri uap. Adapun casing ada dua macm yaitu casing gand dan casing tunggal (pejal). Pada turbin dengan daya yang besar umumnya dipakai casing ganda yaitu untuk mempercepat warmng up pada saat start up unit dari kondisi awal (cool start).

➤ Guidance Blade (Sudu Antar)

Sudu antar bertugas untuk membalikan arah atau mengantarkan energi panas dari sudu jalan ke sudu gerak, dan temat kedudukannya tidak berubah, menurut bentuknya hampir mirip dengan sudu jalan yang ada didekatnya.

➤ Moving Blade (Sudu gerak)

Sudu jalan ini bertugas menerima energi pans dari sudu antar, karena tempatnya pada rotor turbin yang ditumpu oleh bantalan-bantalan maka sudu ini akan berputar.

- Control Valve
Control valve berfungsi untuk mengatru ataumengontrol energi panas yang dibutuhkan oleh turbin.
- Reheat Stop Valve
Reheat stop valve digunakan untuk menutup aliran uap dari reheat denga cepat apabila terjadi gangguan sistem dan juga sebagai pengaman turbin.
- Bearing



Gambar 2.3 Turbin Uap

2.2.3 Kondensor

Kondesor adalah alat untuk merubah fase uap menjadi fase cair dimana dalam pembangkit digunakan untuk merubah uap yang telah memutar turbin diubah kembali menjadi air dengan sistem kondensasi, hasil dari kondensasi ditampung dengan hotwell kemudian dipompa dikembali ke boiler lagi dengan melalui pemanas. Proses kondensasi yaitu dari uap dikondensasikan menjadi air lagi, maka sistem ini biasa disebut sistem tertutup atau close loop. Sebagai pendinginan kondensor

diambilkan air laut yang disirkulasikan melalui tube-tube kondensor.

Kondensor terdiri dari tube-tube kecil yang melintang. Pada tube-tube inilah air pendingin dari laut dialirkan. Sedangkan uap mengalir dari atas menuju ke bawah agar mengalami kondensasi atau pengembunan. Sebelum masuk kedalam kondensor, air laut biasanya melewati debris filter yang berfungsi untuk menyaring kotoran-kotoran ataupun lumpur yang terbawa air laut. Agar uap dapat bergerak turun dengan lancar dari sudu terakhir turbin, maka vakum kondensor harus dijaga, karena jika dengan ada vakum pada kondensor akan membuat tekanan udara pada kondensor menjadi rendah. Dengan tekanan yang lebih rendah di kondensor, maka uap akan bisa bergerak dengan mudah menuju kondensor.



Gambar 2.4 Kondensor

2.2.4 Pompa

Pompa merupakan peralatan untuk mengalirkan fluida dari tekanan rendah ke tekanan tinggi. Pompa pada pembangkit tenaga uap terdiri dari beragam jenis dan fungsi, salah

satunya adalah boiler feed pump. Boiler feed pump menjadi bagian tidak terpisahkan dari sebuah pembangkit tenaga uap, dimana pompa ini memiliki fungsi untuk mensuplai air dalam proses pembakaran di dalam boiler. Air yang dimaksud merupakan penyubliman uap keluaran dari kondensor, fluida dalam kondisi uap membutuhkan energy yang lebih besar untuk dialirkan dibandingkan dalam kondisi cair.

Daya pompa yang digunakan Boiler Feed Pump berbanding lurus dengan peningkatan jumlah uap pada pembangkit dan konsumsi daya untuk boiler feed pump bisa mencapai 5% dari kapasitas generator.



Gambar 2.5 Boiler Feed Pump

2.2.5 Feedwater Heater

Feedwater Heater merupakan suatu peralatan yang digunakan pada siklus pembangkitan uap regenerative. Dengan adanya feedwater heater ini, diharapkan ada dua hal yang bisa diraih yaitu yang pertama untuk meningkatkan temperature dari

feedwater yang mana akan meningkatkan efisiensi keseluruhan. Kedua, yaitu untuk meminimalkan efek thermal pada boiler. Prinsip kerja feedwater heater yaitu dengan memanaskan lagi air keluaran kondensor dengan menggunakan ceratan uap dari turbin dan pada insatiasi tertentu ditambahkan juga drain dari feedwater heater lainnya. Umumnya, feedwater heater menggunakan gabungan beberapa pemanas dengan tekanan tertentu sesuai dengan tekanan yang dicerat dari turbin. Jumlah dan tipe dari feedwater heater sangat tergantung dari siklus uapnya, tekanan operasi dari siklusnya, dan segi ekonomi dari plant, missal biaya operasi yang lebih rendah dapat mengimbangi pengeluaranbiaya modal tambahan.



Gambar 2.5 Feed Water Heater

2.2.6 Deaerator

Deaerator adalah alat yang berfungsi untuk menghilangkan kandungan oksigen atau gas-gas terlarut lainnya pada air umpan sebelum masuk ke boiler. *Deaerator* bekerja berdasarkan sifat oksigen yang kelarutannya pada air akan berkurang dengan adanya kenaikan suhu. *Deaerator* terdiri dari dua drum, drum yang lebih kecil merupakan tempat pemanasan

pendahuluan dan pembuangan gas-gas dari air umpan, sedangkan drum yang lebih besar merupakan tempat penampungan air umpan sebelum masuk ke boiler. Pada drum kecil terdapat *spray nozzle* yang berfungsi untuk menyemprotkan air umpan menjadi butiran-butiran air halus agar proses pemanasan dan pembuangan gas-gas lebih sempurna, dan gas-gas yang tidak terkondensasi dibuang ke atmosfer melalui saluran *vent* pada drum kecil.

Oksigen dan gas-gas terlarut dalam air umpan perlu dihilangkan, karena dapat menyebabkan senyawa oksida yang menyebabkan karat pada pipa dan peralatan pembangkit yang terbuat dari logam. Air jika bereaksi dengan karbondioksida terlarut dapat menyebabkan korosi lebih lanjut. Terdapat dua jenis *deaerator* yang sering digunakan yaitu tipe *Tray* dan tipe *Spray*.



Gambar 2.6 Deaerator

2.3 Tinjauan Termodinamika

2.3.1 Hukum Pertama Termodinamika Untuk Control Volume

Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap, proses produksi banyak berhubungan dengan analisis termodinamika. Salah satu hukum termodinamika yang diaplikasikan adalah penerapan

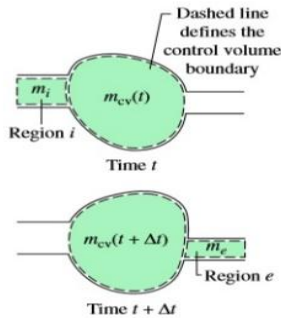
hukum pertama termodinamika untuk control volume pada alat-alat di unit PLTU. Hukum pertama termodinamika adalah hukum konservasi energi atau kekekalan energi. Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan ataupun dilenyapkan. Energi dari suatu sistem yang mengalami perubahan (proses) dapat bertambah atau berkurang oleh pertukaran dengan lingkungan dan diubah dari bentuk yang satu ke bentuk yang lain di dalam sistem itu. Sehingga dalam hukum ini, semua perubahan energi harus diperhitungkan.

Hukum pertama tidak menjelaskan apakah perubahan energi dari satu bentuk ke bentuk lain berlangsung secara sempurna atau tidak. Keterbatasan ini nantinya akan dilengkapi oleh hukum kedua termodinamika.

Telah disebutkan bahwa untuk komponen pembangkitan oleh turbin uap pada unit PLTU, analisis yang digunakan berpedoman pada hukum pertama termodinamika untuk control volume sehingga proses di analisis pada volume tetap, energi dan massa dapat keluar dan masuk melewati boundary layer. Analisis Termodinamika untuk control volume juga tidak terlepas dari hukum kekekalan massa, karena jumlah massa yang masuk dan keluar control volume juga menentukan dalam proses konservasi energi.

Prinsip kekekalan massa dan energi untuk suatu control volume didasarkan pada dua persamaan dasar, yaitu :

- Persamaan yang didasarkan pada hukum konservasi massa



Gambar 2.7 *Control Volume* Konservasi Massa
(Reff 6, hal. 122)

Dari Gambar di atas dapat diketahui bahwa dalam sebuah *control volume* pada waktu (t) terjadi massa masuk yang diberi notasi m_i sementara di dalam *control volume* sudah terdapat massa nya sendiri yang diberi notasi $m_{cv}(t)$. Pada saat waktu $t + \Delta t$ massa di dalam *control volume* mengalami perubahan. Perubahan tersebut adalah terdapat massa keluar yang diberi notasi m_e dan massa di dalam *control volume* yang terperangkap diberi notasi $m_{cv}(t + \Delta t)$. Sehingga perubahan laju aliran massa dalam *control volume* per satuan waktu tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\left[\begin{array}{l} \text{Laju perubahan} \\ \text{massa yang} \\ \text{terdapat dalam} \\ \text{control volume} \\ \text{pada waktu } t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Laju aliran} \\ \text{massa masuk} \\ \text{total yang} \\ \text{melintasi} \\ \text{semua sisi} \\ \text{masuk saat} \\ \text{waktu } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Laju aliran} \\ \text{massa keluar} \\ \text{total yang} \\ \text{melintasi} \\ \text{semua sisi} \\ \text{keluar saat} \\ \text{waktu } t \end{array} \right]$$

$$\frac{dm}{dt} = \sum i \dot{m} - \sum e \dot{m} \dots\dots\dots 2.1$$

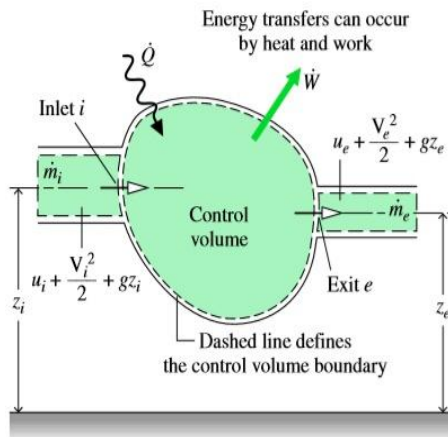
- Keadaan Steady

Dalam perhitungan teknik, sebuah system dapat diidealisasikan sebagai keadaan *steady*, yang berarti bahwa semua sifatnya tidak berubah menurut waktu. Untuk satu *control volume* dengan konservasi massa dalam keadaan *steady*, *properties* dari zat di dalam *control volume* terus menerus berubah, tetapi jumlah massa total yang ada pada setiap saat tetap konstan. Dengan demikian $\frac{dm_{cv}}{dt} = 0$ dan persamaan 2.1 dapat disederhanakan menjadi:

$$0 = \sum i \dot{m} - \sum e \dot{m} \dots\dots\dots 2.2$$

Sehingga, laju aliran massa total yang masuk dan keluar *control volume* adalah sama.

- Persamaan yang didasarkan pada energi kekekalan energy



Gambar 2.8 *Control Volume* Konservasi Massa dan Energi
(Reff 6, hal. 129)

Berdasarkan gambar di atas dan prinsip hukum konservasi energy yang diaplikasikan di control volume adalah :

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{c} \text{Laju} \\ \text{perubahan} \\ \text{energi yang} \\ \text{terdapat} \\ \text{dalam} \\ \text{control} \\ \text{volume} \\ \text{pada} \\ \text{waktu } t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Laju energi} \\ \text{kalor bersih} \\ \text{yang} \\ \text{ditransfer} \\ \text{masuk oleh} \\ \text{perpindahan} \\ \text{panas pada} \\ \text{waktu } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Laju energi} \\ \text{bersih yang} \\ \text{ditransfer} \\ \text{keluar} \\ \text{dalam} \\ \text{bentuk} \\ \text{kerja} \\ \text{pada} \\ \text{waktu } t \end{array} \right] + \\
 & \left[\begin{array}{c} \text{Laju energi} \\ \text{bersih yang} \\ \text{ditransfer} \\ \text{ke dalam} \\ \text{control} \\ \text{volume} \\ \text{yang} \\ \text{dibaawa} \\ \text{oleh laju} \\ \text{aliran massa} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Untuk aliran satu dimensi seperti pada gambar 2.2, persamaan konservasi energinya adalah

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{\overline{v_i^2}}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{\overline{v_e^2}}{2} + gz_e \right) \dots 2.3$$

E_{cv} adalah notasi system di dalam *control volume* pada waktu t (sebelum terjadi perubahan).

Diketahui \dot{W} adalah kerja yang dikeluarkan oleh control volume. Adapun pada *control volume* terdapat 2 jenis kerja, yaitu kerja yang dihasilkan oleh *control volume* (\dot{W}_{cv}) dan kerja yang

dihasilkan system aliran massa masuk untuk mendorong massa ke dalam atau keluar system ($\dot{m}v$) ,sehingga :

$$\dot{W} = \dot{W}_{cv} + \dot{m}v \dots\dots\dots 2.4$$

Maka persamaan 2.3 menjadi

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{\overline{v_i^2}}{2} + gz_i + p_i v_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{\overline{v_e^2}}{2} + gz_e + p_e v_e \right) \dots\dots\dots 2.5$$

- Keadaan Steady

Dalam perhitungan teknik, sebuah sistem dapat diidealisasikan sebagai dalam keadaan *steady*, yang berarti bahwa semua sifatnya tidak berubah menurut waktu. Untuk satu *control volume* dengan konservasi energi dalam keadaan *steady*, *properties* dari zat di dalam *control volume* tidak berubah terhadap waktu sehingga $\frac{dm_{cv}}{dt} = 0$. Apabila diberikan tambahan analis dengan konservasi massa pada keadaan *steady* $\frac{dm_{cv}}{dt} = 0$ sehingga $\dot{m}_i = \dot{m}_e$. Maka persamaan 2.5 menjadi

$$0 = \dot{Q} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{\overline{v_i^2}}{2} + gz_i + p_i v_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{\overline{v_e^2}}{2} + gz_e + p_e v_e \right) \dots\dots\dots 2.6$$

\dot{Q} = kalor yang masuk bila bertanda positif dan keluar bila bertanda negatif. Secara matematis $\Delta\dot{Q}$ dapat dicari dengan persamaan $\Delta\dot{Q} = \dot{m}c_n (T_e - T_i)$, c_n adalah kalor spesifik yang besarnya bergantung pada proses yang berlangsung sesuai dengan tabel 2.1 dengan satuan $\frac{kJ}{kg.K}$ (SI). Adapun \dot{m} adalah laju aliran massa yang mempunyai satuan $\frac{kJ}{kg}$ (SI). T adalah temperatur yang mempunyai satuan K (kelvin) atau bisa juga R (rankine) dan C (celcius) apabila berbentuk Δ atau perbedaan temperatur.

\dot{W}_{cv} = adalah kerja yang dilakukan oleh system bila bertanda positif dan kerja yang diterima oleh system bila bertanda negatif.

$\dot{m}.u = \dot{U}$ = adalah energy dalam yang merupakan fungsi temperature bagi gas ideal. Sementara gas, uap dan cairan yang non ideal terutama fungsi temperature tapi sedikit juga dipengaruhi tekanan. Adapun satuannya adalah : $u = \frac{kJ}{kg}$; $\dot{U} = \frac{kJ}{s}$ (SI).

$\dot{m}.\frac{\bar{v}^2}{2}$ = adalah energy kinetic yang dimiliki massa keluar dan masuk *control volume*. Adapun satuannya adalah $\bar{V} = \frac{m}{s}$ (SI).

$\dot{m}.g.z$ = adalah energy potensial dari massa masuk dan keluar *control volume*. Satuan dari $g = \frac{m}{s^2}$; $z = m$ (SI).

$\dot{m}.p.v$ = adalah energy aliran yang dibawa oleh massa masuk dan keluar *control volume*. Satuan dari $P = Pa$ atau $\frac{N}{m^2}$; $v = \text{volume spesifik} = \frac{m^3}{kg}$ (SI).

➤ Enthalpi

Jumlah $U + pV$ dan $u + pv$ sering muncul bersama-sama dalam termodinamika. Oleh karena itu hubungan ini diberi nama tertentu, yaitu enthalpi dengan lambang H dan h , dimana $h = \text{enthalpi spesifik} = \frac{H}{m}$, jadi

$$H = U + pV \quad \dots\dots\dots 2.7$$

$$h = u + pv \quad \dots\dots\dots 2.8$$

apabila persamaan (2.4) dimasukkan ke persamaan 2.5 maka persamaan menjadi

$$0 = \dot{Q} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{\overline{v_i^2}}{2} + gz_i + p_i v_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{\overline{v_e^2}}{2} + gz_e + p_e v_e \right) \quad \dots\dots\dots 2.9$$

Enthalpy dan energi adalah sifat (*properties*) fluida, yang berarti masing-masing mempunyai satu nilai tunggal untuk setiap keadaan tertentu fluida itu. Definisinya adalah

$$C_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad \dots\dots\dots 2.10$$

$$C_p \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_p \quad \dots\dots\dots 2.11$$

Dimana c_p adalah kalor spesifik pada tekanan tetap dan c_v adalah kalor spesifik pada volume tetap. Keduanya mempunyai satuan $\frac{kJ}{kg.K}$ (*SI*). Hubungannya satu sama lain adalah

$$c_p - c_v = R \quad \dots\dots\dots 2.12$$

Dimana R adalah konstanta gas. Untuk gas ideal persamaan tersebut bisa menjadi

$$du = c_v dT \quad \dots\dots\dots 2.13$$

$$du = c_p dT \quad \dots\dots\dots 2.14$$

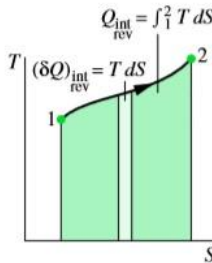
Dimana $c_v - c_p$ adalah konstanta dan tidak bergantung pada suhu untuk gas beratom satu, seperti helium, tetapi meningkat dengan temperature untuk beratom dua seperti udara, dan lebih lagi untuk gas beratom tiga seperti CO_2 , dsb. Untuk kalor spesifik tetap, atau bila perubahan temperature kecil, maka persamaan (2.13) dan (2.14) dapat dituliskan berikut :

$$\Delta u = c_v \Delta T \quad \dots\dots\dots 2.15$$

$$\Delta h = c_p \Delta T \quad \dots\dots\dots 2.16$$

➤ Entropi

Entropi adalah salah satu sifat termodinamika yang dapat didefinisikan sebagai suatu sifat yang menyatakan ketidakmampubalikan atau sebagai ukuran ketidakaturan zat pada tingkat mikroskopik. Karena entropi merupakan sifat atau *properties* sehingga dapat dicari nilainya seperti sifat lainnya.



Gambar 2.9 T-S Diagram Perubahan Entropi
(Reff 6, hal. 218)

Dari gambar di atas diketahui bahwa terjadi panas masuk yang digambarkan dalam T-S diagram dengan persamaan.

$$\partial Q = TdS \quad \dots\dots\dots 2.17$$

2.3.2 Hukum Kedua Termodinamika

Hukum kedua termodinamika memberikan batasan mengenai konversi beberapa bentuk energy menjadi bentuk lain. Ada dua bentuk energy yang palig banyak mendapatkan perhatian, yaitu kalor (*heat*) dan kerja (*work*). Sehingga hukum kedua termodinamika tidaklah membantah kesetaraan dalam konversi itu berlangsung. Kerja adalah komoditas yang penting. Hal ini disebabkan karena kerja dapat dikonversikan seluruhnya dan secara terus menerus menjadi kalor, tetapi sebaliknya kalor tidak dapat dikonversikan seluruhnya dan secara terus menerus menjadi kerja. Dengan kata lain kalor tidak seluruhnya tersedia untuk melakukan kerja secara terus- menerus, yaitu dalam siklus (walaupun mungkin dalam proses).

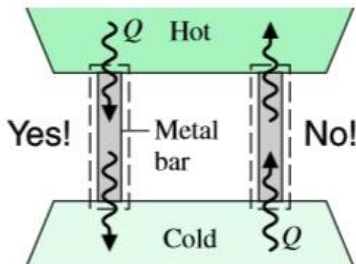
Bagian kalor yang tidak dapat dikonversikan menjadi kerja, disebut energy tak tersedia, harus dibuang sebagai kalor berderajat rendah setelah melakukan kerja. Cara lain untuk menyatakan hokum kedua adalah bahwa efisiensi thermal

pengubahan kalor menjadi kerja *heat engine* selalu kurang dari 100 persen.

Ada dua pernyataan terkenal untuk menggambarkan hukum kedua termodinamika, yaitu pernyataan Kelvin-Planck dan Clausius.

➤ Pernyataan Clausius

Sesuatu yang tidak mungkin pada suatu system untuk beroperasi pada sebuah keadaan yang menghasilkan perpindahan energy panas dari daerah yang dingin ke panas tanpa ada energi lain.

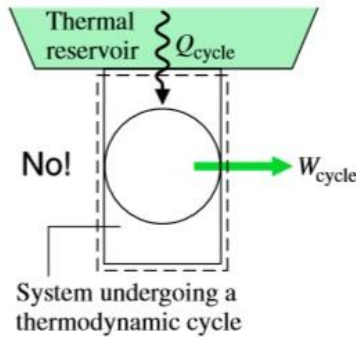


Gambar 2.10 Ilustrasi Pernyataan Clausius
(Reff 6, hal. 178)

Gambar di atas menggambarkan maksud dari pernyataan Clausius. Sehingga perpindahan energy panas secara natural tidak mungkin terjadi dari daerah yang bertemperatur rendah ke temperature tinggi.

➤ Pernyataan Kelvin-Planck

Sesuatu yang tidak mungkin untuk sebuah system beroperasi di siklus termodinamika dan menghantarkan energy kerja ke lingkungan ketika menerima energy panas yang ditransfer hanya dari satu sumber panas.



Gambar 2.11 Ilustrasi Pernyataan Kelvin-Planck
(Reff 6, hal. 178)

Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa tidak mungkin energy kalor dikonversi semua ke dalam energy kerja tanpa ada energy kalor yang dibuang. Sehingga efisiensi proses 100%.

Berkaitan dengan entropi, maka perubahan entropi setelah proses S_2 dan sebelum proses S_1 berdasarkan hukum termodinamika kedua adalah :

1. jika $S_2 - S_1 > 0$ maka proses adalah irreversible (actual)
2. jika $S_2 - S_1 = 0$ maka proses adalah reversible (ideal)
3. jika $S_2 - S_1 < 0$ maka proses impossible atau tidak ada.

2.3.3 Konsep Irreversibilitas pada PLTU

Proses mampu balik (reversible proses) juga disebut proses ideal. Adalah proses yang dapat berbalik sendiri menurut langkah yang persis sama dengan langkah yang semula, dan dengan demikian mengembalikan semua kalor dan kerja yang dipindahkan ke system atau lingkungan. Sementara, pada kenyataannya hal tersebut tidak ada. Sehingga yang ada adalah proses *Irreversibilitas*. (El Wakil, 1984)

Untuk proses dalam pembangkit listrik tenaga uap ada dua sumber *irreversibilitas*, yaitu *intern* dan *ektern*.

➤ *Eksternally*

Sumber utama *irreversibilitas ekstern* adalah perpindahan kalor pada boiler dan condenser. Selain itu juga gesekan mekanik dalam bantalan mesin –mesin rotary.

➤ *Internally*

Sumber utama *irreversibilitas internally* adalah gesekan fluida di dalam komponen yang dilalui fluida, termasuk pipa, katup, *throttle* dan *mixing*.

2.4 Siklus Rankine pada Turbin Uap PLTU

Siklus Rankine sebagai standar untuk pembangkit daya yang menggunakan uap. Siklus Rankine yang digunakan nyata dalam instalasi pembangkit daya jauh lebih rumit dari pada siklus rankine ideal asli yang sederhana. Kerumitan tersebut merupakan modifikasi yang bertujuan untuk menjadikan siklus itu paling efisien untuk membangkitkan listrik dewasa ini.

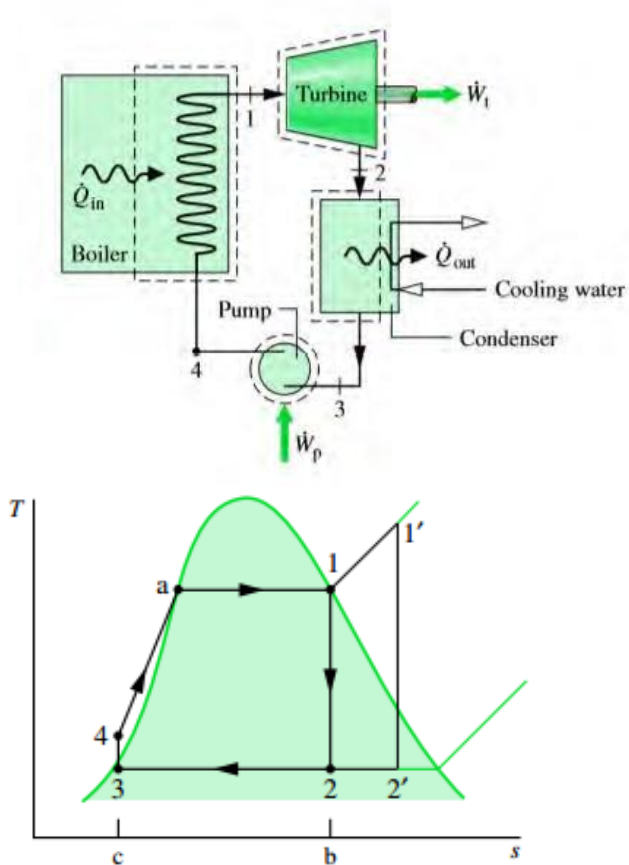
2.4.1 Siklus Rankine Ideal

Siklus rankine ideal yang umum digunakan di PLTU adalah sebagai berikut :

Siklus ini terdiri dari 4 proses, yaitu :

1. Proses 3 -4 : kompresi isentropic dalam pompa menuju ke kondisi 4 dalam daerah cairan hasil kompresi.
2. Proses 4 -1 : perpindahan kalor ke fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui boiler untuk menyelesaikan siklus.
3. Proses 1 -2 : ekspansi isentropic dari fluida kerja melalui turbin dari uap jenuh pada kondisi 1 hingga mencapai tekanan condenser

4. Proses 2 -3 : perpindahan kalor dari fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui condenser dengan cairan jenuh pada kondisi 3



Gambar 2.12 Blok Diagram Siklus Rankine Ideal

2.4.2 Siklus Rankine Aktual PLTU

Telah disebutkan sebelumnya bahwa jumlah komponen dari siklus rankine actual lebih kompleks daripada yang ideal. Seperti gambar (2.13) , diketahui bahwa dari blok diagram tersebut terdapat beberapa tambahan komponen untuk menaikkan efisiensi siklus. Masing-masing komponen mempunyai peran sendiri-sendiri dalam menaikkan efisiensi siklus. Komponen yang digunakan antara lain:

1. *Superheater*

Sesuai dengan namanya, *superheater* mempunyai fungsi untuk menaikkan temperatur uap yang telah terbentuk di dalam water wall boiler. Sehingga didapatkan uap yang mempunyai temperature tinggi agar didapatkan kerja turbin yang besar ketika diekspansikan.

2. *Reheater*

Panas dari pembakaran bahan bakar di dalam bahan bakar sangat besar dan bisa dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Salah satunya dengan reheater yang bertujuan untuk menaikkan kembali temperature uap yang tekanannya telah turun setelah diekspansika di turbin pertama.

3. *Closed Feed Water System*

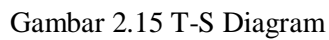
Semakin tinggi temperature fluida kerja yang masuk boiler untuk menerima panas maka semakin sedikit panas yang harus diberikan boiler kepada fluida kerja untuk merubah fase. Sehingga tugas *Closed feedwater sytem* adalah memindahkan panas dari steam yang diambil dari turbin untuk dipindahkan ke fluida kerja melalui kontak tidak langsung. Dengan adanya perpindahan panas ke *feedwater*, maka akan terjadi penurunan temperature uap dan kenaikan temperature *feedwater* yang masuk dan keluar dari *feed water heater*. Perbedaan temperature ini dinyatakan dalam dua jenis yaitu :

- TTD (*Terminal Temperatur Different*) = Temperatur *extraction steam* - Temperatur keluar *feedwater*.
 - DCA (*Drain Cooler Approach*) = Temperatur drain dari shell *feedwater* – Temperatur *feedwater* masuk.
4. *Open Feed Water System*
 Berfungsi sama dengan *closed feed water system*, tapi *open feed water system* melakukan dengan kontak langsung / *mixing*.
5. *Trap*
 Berguna untuk menurunkan tekanan dari fluida kerja tapi tidak merubah nilai enthalpinya. Sehingga $h_i = h_e$, hal ini terjadi karena kenaikan kecepatan akibat penyempitan dapat diabaikan akibat kembalinya luasan aliran seperti pada saat keadaan masuk.

2.4.3 Evaluasi Kerja dan Energi Kalor Pada Siklus Aktual

Untuk mengevaluasi kerja dan kalor, maka disepakati bahwa perpindahan energy kalor yang masuk ke system dianggap positif sementara bernilai negatif untuk kerja, begitu juga sebaliknya. Selain itu digunakan beberapa asumsi lagi untuk memudahkan analisis, yaitu :

1. Perpindahan kalor dan massa ke luar system diabaikan.
2. Perubahan energy kinetic dan potensial diabaikan
3. Steady state, steady flow.



- 32

Massa uap disirkulasi di dalam system terbagi-bagi sesuai dengan persamaan berikut :

$$y' = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \text{ dan } y'' = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_1} \dots\dots\dots 2.18$$

dimana \dot{m}_1 menunjukkan mass flow rate masuk pada turbin stage pertama.

Fraksi y' dapat ditentukan dengan penerapan *mass and energy rate balance to a control volume enclosing the closed heater*. Hasilnya

$$y' = \frac{h_{11}-h_{10}}{h_2-h_{12}} \dots\dots\dots 2.19$$

Fraksi y'' dapat ditentukan dengan penerapan *mass and energy rate balance to a control volume enclosing the open heater*. Hasilnya

$$y'' = \frac{(1-y)h_8+y'h_{13}-h_9}{h_8-h_5} \dots\dots\dots 2.20$$

- Evaluasi Kerja Turbin
 Dengan mengaplikasikan *control volume* pada kedua turbin dan dengan menggunakan asumsi yang telah disebutkan maka kerja turbin didapat dengan

$$\dot{W}_t = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \dots\dots\dots 2.21$$

$$\frac{\dot{W}_{t1}}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_2) + (1 - y')(h_2 - h_3) \dots\dots\dots 2.22$$

$$\frac{\dot{W}_{t2}}{\dot{m}_1} = (1 - y')(h_3 - h_5) + (1 - y' - y'')(h_5 - h_6) \dots\dots\dots 2.23$$

- Evaluasi Kalor Masuk
 Dengan mengaplikasikan *control volume* pada boiler dan dengan menggunakan asumsi yang telah disebutkan maka kalor masuk didapat dengan.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \dots\dots\dots 2.24$$

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_{11}) + (1 - y')(h_4 - h_3) \dots\dots\dots 2.25$$

- Evaluasi Kerja Pompa

Dengan mengaplikasikan *control volume* pada pompa dan dengan menggunakan asumsi yang telah disebutkan maka kerja pompa didapat dengan

$$\dot{W}_p = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \dots\dots\dots 2.25$$

Karena ada 2 pompa di dalam system sehingga persamaan (2.25) menjadi

$$\frac{\dot{W}_{p1}}{\dot{m}_1} = (1 - y' - y'')(h_8 - h_7) \dots\dots\dots 2.26$$

$$\frac{\dot{W}_{p2}}{\dot{m}_1} = (h_{10} - h_9) \dots\dots\dots 2.27$$

- Evaluasi Kerja Siklus

Beberapa parameter yang digunakan sebagai indicator unjuk kerja siklus Rankine adalah :

1. Kerja / Daya Netto, $\dot{W}_{nett} = \dot{W}_t - \dot{W}_p$ atau $w_{nett} = w_t -$

$$w_p$$

2. Laju Kalor masuk, q_{in}

3. Efisiensi Thermal, dapat didefinisikan sebagai kerja bersih yang didapatkan dibagi dengan panas yang

$$\text{masuk ke siklus, } \eta = \frac{w_t - w_p}{q_{in}}$$

$$\eta = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

4. *Heat Rate* adalah panas yang masuk ke siklus dibagi dengan kerja bersih yang didapat

$$HR = \frac{q_{in}}{w_t - w_p}$$

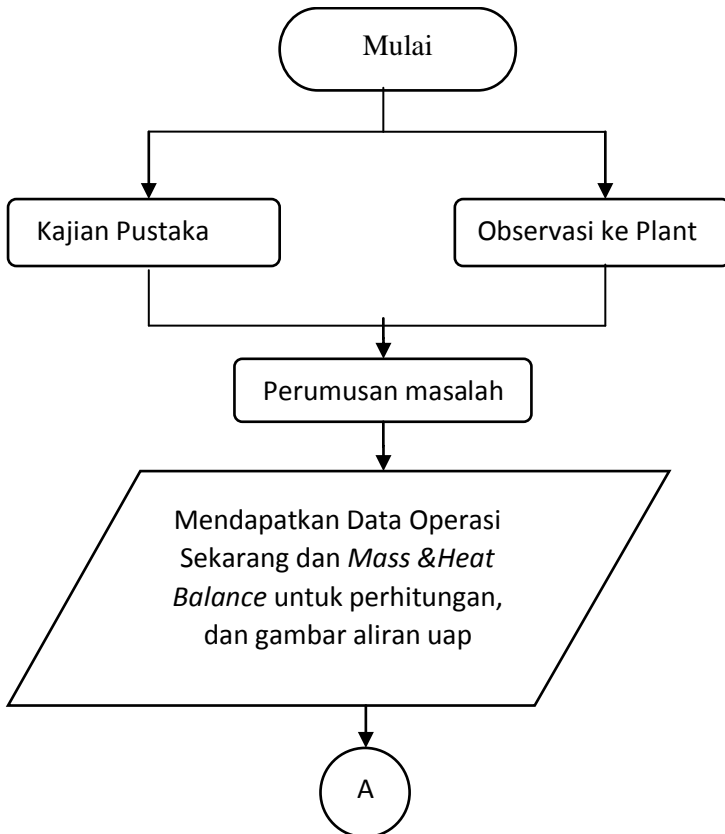
BAB III

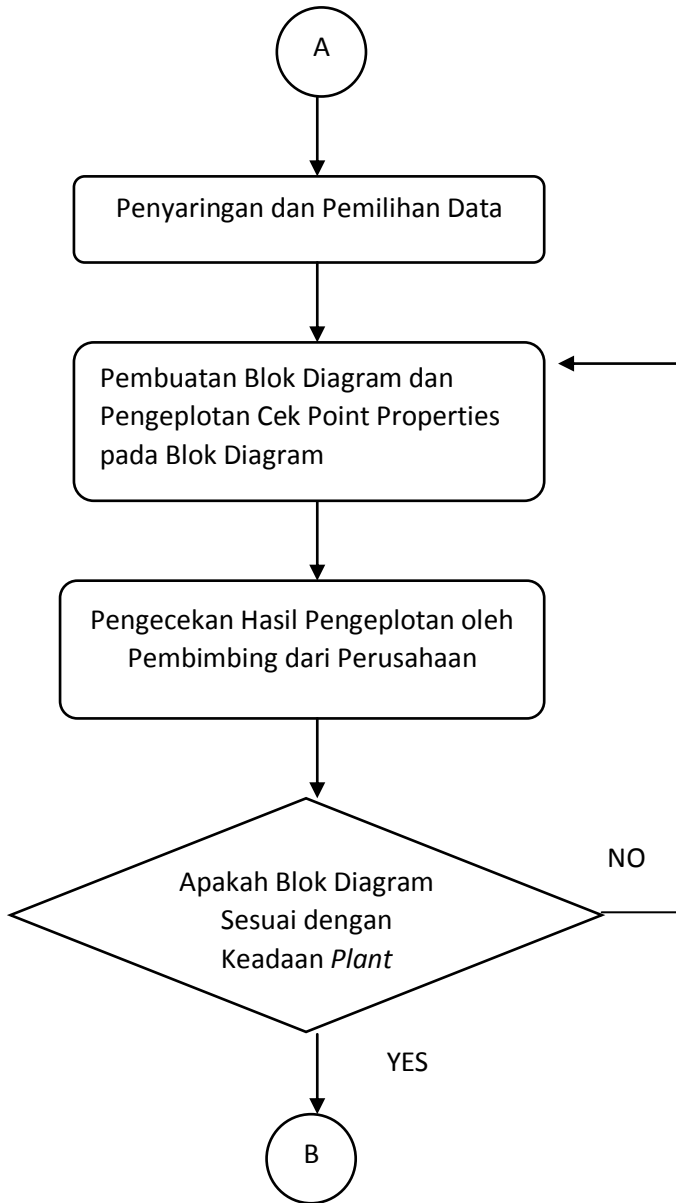
METODOLOGI PENELITIAN

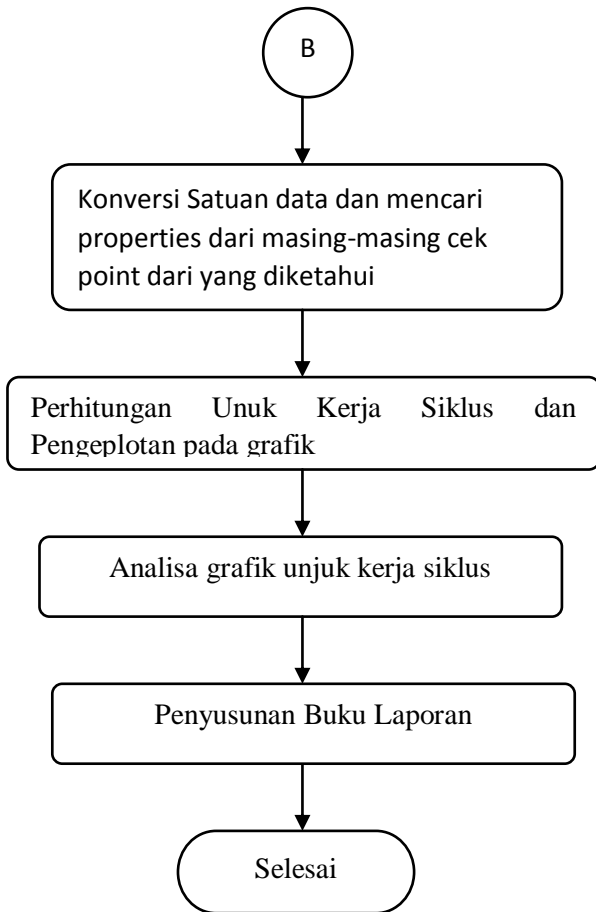
3.1. Flow Chart Penelitian

Metode yang digunakan dalam studi harus tersruktur dengan baik sehingga dapat dengan mudah menerangkan atau menjelaskan penelitian yang dilakukan. Oleh karena itu langkah-langkah dalam pelaksanaan penelitian ini digambarkan dalam diagram alir berikut ini

3.2 Diagram Alir Penelitian







Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir

3.3. Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

1. Kajian Pustaka
Meliputi studi buku-buku literature yang digunakan dalam perkuliahan, buku-buku di perpustakaan pusat ITS yang berhubungan dengan materi, buku-buku di perpustakaan PT. PJB UP Gresik yang berhubungan dengan system kerja plant PLTU.
2. Observasi
Mengamati proses produksi dan operasi di plant PLTU PT. PJB UP Gresik. Hasil dari observasi dan kajian pustaka mendapatkan.
 - Blok diagram air dan uap yang terdapat pada lampiran III sesuai mapping di plant dengan mengabaikan kebocoran-kebocoran massa air dan uap ke lingkungan.
 - Data rekap operasi sekarang dan operasi Mass & Heat Balance unit yang ada di lampiran III

3.4. Spesifikasi Alat di PLTU PT PJB UP Gresik Unit 2

1. *Boiler*

Type	: IHI SN Type Boiler
Steam Generating Capacity	: 400.000 kg/h
Maximum Working Pressure	: 110 kg/cm ²
Working Pressure	: 91 kg/cm ²
Working Temperature	: 513 °C
Feed Water Temperature	: 232.8° C
Date Manufactured	: May 1980

Manufactured By

: Ishikawajima-Harima
Heavy Industries

Draft System

: Forced Draft



Gambar 3.2 Boiler Unit 2

2. *Steam Turbine*

Type	: Single cylinder type condensing turbine
Manufacturer	: Toshiba
Speed (rpm)	: 3000
Number of Extraction	: Five (5)
Kapasitas	: 100.000 kw
Tekanan Uap Masuk	: 88 kg/cm ²
Temperature	: 510° C
Critical Speed	: 1722 (at single span flexible support)
Length of last stage blade (mm)	: 663,6
Annulus area of last stage blade	: 4,83 (m ²)

Bearing

Type	: Single & double tilting pad type
Number	: Two (2)
Trust bearing type	: Tapered land type

3. *Steam Generator*

Type	: IHI SN-Type Boiler
Manufacture	: IHI
Number	: One set
Steam Generation (kg/h)	: 400000

Design Pressure ($\text{kg/cm}^2\text{g}$) : 110

Design Temperature ($^{\circ}\text{C}$) at SH outlet : 513



Gambar 3.3 Steam Turbine & Steam Generator Unit 2

4. *Condenser*

Type : Two passes, reverse flow, divided water box, horizontal surface type

Manufacture : Toshiba

Water velocity in tube (m/sec) : 2,096

Friction loss through tube(kg/cm^2): 0,43

Total Effective tube surface (m^2) : 6080

Tube

Effective tube length (mm) : 7938

Overall tube length (mm) : 8000

Material

Main condensing zone Brass	: Alumunium (JIS H3300 C6871T)
Air cooling zone and exhaust implingement zone TTH)	: Titanium (JIS H4631 TTH)



Gambar 3.4 Condenser Unit 1 dan 2

5. *Condensate Pump*

Type	: Vertical barrel type 3- stage single suction deffuser (TSM-VB5)
------	---

Manufacturer	: Yoshikura Kogyo
Number	:Two (2) set
Capacity (ton/h)	: 365
Total Head (kg/cm ² g)	: 16
NPSH required (m)	:3,9
Number of Stage	: 3
Motor	
Type	: Indoor use, drip proof
Capacity (KW)	: 235
Voltage (V)	: 4000



Gambar 3.5 Condensate Pump Unit 1 dan 2

6. *Deaerator*

Type	:Cylindrical, spray and tray type
Manufacturer	: Toshiba
Design Quantity (ton/h)	: 410,37
Oxygen Content (cc/liter)	:0,005
Dimension	
Overall Length (mm)	: 510
Diameter (mm)	: 1600

Design Pressure ($\text{kg/cm}^2\text{g}$) : 8,8

Design Temperature ($^{\circ}\text{C}$) : 177



Gambar 3.6 Deaerator Unit 2

7. *Boiler Feed Pump*

Type : Barrel \, double casing type

Manufacturer : EBARA

Number : Three (3) set

Capacity (ton/h) : 220

Total Head ($\text{kg/cm}^2\text{g}$) : 102

Discharge Head ($\text{kg/cm}^2\text{g}$) : 110

Speed (rpm) : 2980

Number of Stage : 9

Type of Seal : Mechanical Seal

Motor

Type : Indoor use,

Capacity (KW) : 950

Voltage (V) : 4000



Gambar 3.7 Boiler Feed Pump Unit 1 dan 2

8. *High Pressure Heater*

Type : Horizontal U-Tube

Manufacturer : Toshiba

Tube Surface Area

Desuperheater zone (m²): 30,4

Condensing zone (m²) : 243,5

Drain cooling zone (m²) : 56,1

Total (m²) : 330

Water velocity in tube (m/sec) : 1,779

Friction loss through tube : 0,461
(kg/cm²)

Design feed water flow (kg/h) : 388980

Tube

Size and thickness (mm): 16[∅] x 1,8^t

Number of Tube : 531

At ECR Condition

Dimension

Overall Length (mm) : 7463

Shell Diameter (mm) : 1050

Material

Tube : JIS G3461(STB42)

Design Pressure and Temperatur

Tube Side (kg/cm²g, ° C): 125/224

Shell Side (kg/cm²g, ° C): steam inlet 24/224,
324 ° C



Gambar 2.8 High Pressure Heater Unit 2

9. *Low Pressure Heater*

Type : Horizontal U-Tube
condenser neck

Manufacturer : Toshiba

Tube Surface Area

Condensing zone (m^2) : 287,85

Drain Cooling Zone (m^2): 82,15

Total (m^2) : 370

Water Velocity in tube (m/sec) : 1,597

Friction loss through tube : 0,525
(kg/cm^2)

Design feed water flow (kg/h) : 322500

Tube

Size and thickness (mm): 16^ø x 1,25^t

Number of Tube : 392

At ECR Condition

Dimension

Overall Length (mm) : 11296

Shell Diameter (mm) : 1000

Material

Tube : JIS H3300(C6871T)

Design Pressure and Temperature

Tube Side (kg/cm²g, °C): 15/105

Shell Side (kg/cm²g, °C): 0,2/105



Gambar 3.9 Low Pressure Heater Unit 2

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab berikut akan dijabarkan langkah-langkah perhitungan unjuk siklus rankine PLTU dengan menggunakan:

1. Data operasi sekarang.
2. Data heat balance dengan perhitungan metode seperti data operasi sekarang (fraksi massa).
3. Data *Mass & Heat Balance*.

4.1 Data Yang Digunakan

Data yang digunakan merupakan data yang diperoleh dari data Performance Test pada PLTU Blok 2. Data sebelum dilakukan Overhaul diambil pada tanggal 29 Maret 2015 sedangkan data sesudah dilakukan Overhaul diambil pada tanggal 29 Juni 2015

4.2 Perhitungan Unjuk Kerja Siklus Rankine Unit Sebelum Overhaul.

Perhitungan unjuk kerja dilakukan dengan menggunakan data performa test dengan cara analisis termodinamika.

4.2.1 Perhitungan Properties Pada Cek Point

Metode perhitungan didasarkan pada beberapa asumsi untuk menyederhanakan perhitungan.

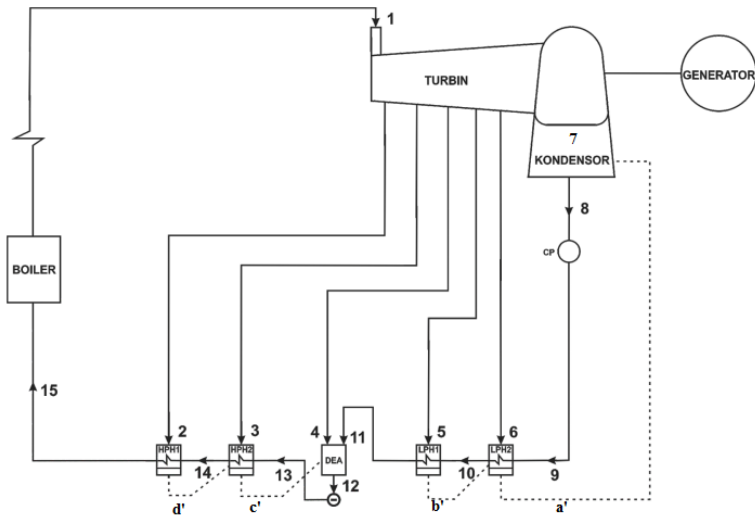
Asumsi :

1. Keadaan Steady State Steady Flow
2. Analisis termodinamika dengan control volume pada masing- masing komponen sesuai dengan yang terdapat di blok diagram lampiran
3. Tidak ada perpindahan panas dan massa yang tidak dikehendaki ke lingkungan
4. Energi Kinetik dan Potensial diabaikan.
5. Proses berlangsung secar isentropis pada turbin yang datanya tidak lengkap untuk mencari propertiesnya.
6. Extraction Steam ke Deaerator dan Turbin berlangsung pada tekanan yang sama.

Analisis properties dari masing-masing cek point dengan menggunakan tabel termodinamika dari Buku “Fundamental of Thermodynamics” 7 th karangan Claus Borgnakke dan Ricard E.sontag yang terdapat pada lampiran II

4.2.2 Blok Diagram PLTU Unit 2 PT PJB UP Gresik

Menggambar blok diagram PLTU menggunakan data teknik yang ada pada tiap kondisi.



Gambar 4.1 Blok Diagram PLTU Unit 2

Titik 1

Titik 1 adalah keadaan dimana uap pertama kali masuk turbin tekanan tinggi. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan sebesar $p_1 = 8629.85$ kPa dan temperatur $T_1 = 510$ °C akan didapat nilai enthalpy (h) sebesar

$$h_1 = 3412,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_1 = 6.7114 \frac{kJ}{kg} \cdot K$$

Titik 2

Titik 2 merupakan keadaan dimana uap yang telah digunakan untuk memutar poros turbin bertekanan tinggi (exhaust steam) dikeluarkan menuju HP Heater 1. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan $p_2 = 3000.835$ kPa dan temperatur $T_2 = 233.9$ °C akan didapat nilai enthalpy (h) dan nilai entropy (s) sebesar :

$$h_2 = 3189.4 \frac{kJ}{kg} ,$$

$$s_2 = 6.8578 \frac{kJ}{kg} K$$

$$s_1 = s_2' = 6.7114 \frac{kJ}{kg} K$$

$$\text{maka } h_2' = 3096.6 \frac{kJ}{kg}$$

Titik 3

Titik 3 adalah keadaan dimana uap masuk ke dalam HP Heater 2. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan $p_3 = 1800.509$ kPa dan temperature $T_3 = 207.1$ °C akan dicari nilai enthalpy (h) dan nilai entropy (s) pada titik 3 sebesar :

$$h_3 = 3065.6 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_3 = 6.8892 \frac{kJ}{kg} K$$

$$s_2 = s_3' = 6.8578 \frac{kJ}{kg} K ,$$

$$\text{maka } h_3' = 3077.2 \frac{kJ}{kg}$$

Titik 4

Dari data operasi diketahui titik 3 keluar HP Heater 2. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni $p_4 = 718.8274$ kPa dan $T_4 = 166$ °C. Didapatkan nilai enthalpy (h) dan nilai entropy (s) sebesar :

$$\begin{aligned}h_4 &= 2948.4 \frac{kJ}{kg} \\s_4 &= 7.0846 \frac{kJ}{kg} K \\s_3 = s_3' &= 6.8892 \frac{kJ}{kg} K , \\ \text{maka } h_4' &= 2851.0 \frac{kJ}{kg}\end{aligned}$$

Titik 5

Titik 5 adalah keadaan turbin menuju ke LP Heater 3. Dengan menggunakan data properties yakni tekanan $P_5 = 301.0642$ kPa , $T_5 = 133,7$ °C akan dicari nilai enthalpy (h) dan nilai entropy (s) sebesar :

$$\begin{aligned}h_5 &= 2822.5 \\s_5 &= 7.4865 \frac{kJ}{kg} K \\s_4 = s_5' &= 7.0846 \frac{kJ}{kg} K , \\ \text{maka } h_5' &= 2764.2 \frac{kJ}{kg}\end{aligned}$$

Titik 6

Pada titik ini merupakan keadaan dimana uap masuk ke dalam LP Heater 4. Dari table dengan menggunakan data properties tekanan $p_6 = 84.2391$ kPa dan $T_6 = 94.9$ °C akan dicari nilai enthalpy (h) dan nilai entropy (s) pada titik 6. Maka didapatkan nilai h_6 sebagai berikut.

$$h_6 = 2750.148 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_6 = 7.7340 \frac{kJ}{kg} K$$

$$s_5 = s_6' = 7.4865 \frac{kJ}{kg} K ,$$

$$\text{maka } h_6' = 2690.0 \frac{kJ}{kg}$$

Titik 7

Titik 7 merupakan keadaan turbin stage akhir menuju *condenser*. Diketahui $P_7 = 8.6659$ kPa. Maka didapat nilai enthalpy (h) dan nilai entropy (s) pada titik 7 sebesar :

$$h_7 = 2675.7 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_6 = s_7' = 7.7340 \frac{kJ}{kg} K$$

$$\text{maka } h_7' = 2637.8 \frac{kJ}{kg}$$

Titik 8

Titik 8 adalah keadaan keluar condenser menuju *condensate pump* dimana pada titik ini, uap air telah dibuang panasnya dan telah dikondensasikan. Diketahui $T_8 = 43,1$ °C . Maka dengan menggunakan metode interpolasi didapat harga h_8 sebagai berikut.

$$h_8 = 180,52 \frac{kJ}{kg}$$

Titik 9

Titik ini merupakan keadaan keluar condensate pump menuju ke LP Heater 2. Diketahui $p_9 = 3000.8$ kPa dan $T_9 = 44,3$ °C. Karena fase sudah dalam keadaan liquid maka volume spesifiknya dianggap tidak berubah jika dipompakan ($v_8 = v_9$, asumsi fluida incompressible) sehingga enthalpy pada titik ini dapat diketahi dari persamaan.

$$\begin{aligned}
 h_9 &= h_8 + v_8(p_9 - p_8) \\
 &= 180,52 + 0,0010403 (3000.8 - 8,754) \\
 h_9 &= 183.63 \frac{kJ}{kg}
 \end{aligned}$$

Titik 10

Titik ini merupakan keadaan Compress liquid dimana air kondensat masuk ke dalam LP Heater 1. Diketahui temperature $T_{10} = 92,1$ °C dan tekanan $p_{10} = p_9 = 3000.8$ kPa. Dengan menggunakan metode interpolasi table A-5 maka didapatkan nilai h_{10} sebagai berikut.

$$h_{10} = 388,05 \frac{kJ}{kg}$$

Titik 11

Titik ini merupakan keadaan air kondensat memasuki Deaerator. Diketahui $P_{11} = p_{10} = 3000.8$ kPa ; $T_{11} = 130,9$ °C. Maka didapat nilai enthalpy (h) pada titik 11 sebesar :

$$h_{11} = 549.7 \frac{kJ}{kg}$$

Titik 12

Pada titik ini, keadaan *saturated liquid* air keluar *deaerator* menuju *boiler feed pump*. Dimana nilai h_{12} dapat diketahui melalui persamaan

$$\begin{aligned}
 (\dot{m}_4 \cdot h_4) + (\dot{m}_{11} \cdot h_{11}) + (\dot{m}_c \cdot h_c) &= \dot{m}_{12} \cdot h_{12} \\
 ((5.838)(2948.4) + (89.65)(549.7) + (12.63)(737.22)) &= \\
 (108.136)(h_{12})
 \end{aligned}$$

$$h_{12} = 701.010 \frac{kJ}{kg}$$

nilai $\dot{m}_c \cdot h_{bc}$ didapat dari data drain shell yang keluar dari HP Heater 2

Titik 13

Titik 13 ini adalah keadaan keluar *boiler feed pump* menuju HP Heater 2 dimana $P_{13} = 8629.85 \text{ kPa}$ dan $T_{13} = 168,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Maka dari table data nilai enthalpy dapat diketahui yaitu :

$$h_{13} = 717.9 \frac{kJ}{kg}$$

Titik 14

Titik 14 adalah keadaan dimana keluar dari HP Heater 2 menuju HP Heater 1. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan $P_{14} = P_{13} = 8629.85 \text{ kPa}$ dan $T_{14} = 204,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Maka didapatkan nilai h_{14} sebagai berikut.

$$h_{14} = 874.8 \frac{kJ}{kg}$$

Titik 15

Titik 15 adalah kondisi keluar HP heater 1 menuju ke boiler dimana $P_{15} = P_{14} = 8629.85 \text{ kPa}$ dan $T_{15} = 231,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Sehingga dari data dapat diketahui nilai enthalpy sebesar

$$h_{15} = 996.62 \frac{kJ}{kg}$$

Titik a'

Titik ini adalah keadaan drain shell dari LP Heater 2 kembali ke condenser. Dimana nilai $h_{a'}$ dapat diketahui melalui persamaan

$$(\dot{m}_5 \cdot h_5) + (\dot{m}_6 \cdot h_6) = \dot{m}_{a'} \cdot h_{a'}$$

$$(6.35)(2822.52) + (7.11)(2750.1) = (13.46) h_{a'}$$

$$h_a' = 2784.26 \frac{kJ}{kg}$$

Titik b'

Titik ini adalah keadaan drain shell dari LP Heater 1 kembali ke LP Heater 2. Dimana nilai h_b' dapat diketahui melalui data

$$h_b' = 409.19 \frac{kJ}{kg}$$

Titik c'

Titik ini adalah keadaan drain shell keluar dari HP heater 2 kembali ke deaerator. Dimana nilai h_c' dapat diketahui dari data

$$h_c' = 740.56 \frac{kJ}{kg}$$

Titik d'

Titik ini adalah keadaan drain shell keluar dari HP Heater 1 kembali ke HP Heater 2. Dimana nilai h_d' dapat diketahui dari data

$$h_d' = 897.0 \frac{kJ}{kg}$$

4.2.3 Perhitungan Effisiensi Isentropis

$$\begin{aligned} 1. \quad \eta_{1-2} &= \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'} \\ &= \frac{3412.4 - 3189.4}{3412.4 - 3096.6} \\ &= 0.70 \end{aligned}$$

$$2. \quad \eta_{2-3} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_3'}$$

$$= \frac{3189.4-3065.6}{3189.4-3047.9}$$

$$= 0.87$$

$$3. \quad \eta_{3-4} = \frac{h_3-h_4}{h_3-h_4'}$$

$$= \frac{3065.6-2948.46}{3065.6-2851.0}$$

$$= 0.54$$

$$4. \quad \eta_{4-5} = \frac{h_4-h_5}{h_4-h_5'}$$

$$= \frac{2948.46-2822.52}{2948.46-2764.2}$$

$$= 0.68$$

$$5. \quad \eta_{5-6} = \frac{h_5-h_6}{h_5-h_6'}$$

$$= \frac{2822.52-2750.14}{2822.52-2692.0}$$

$$= 0.55$$

$$6. \quad \eta_{5-6} = \frac{h_5-h_6}{h_5-h_6'}$$

$$= \frac{2750.14-2675.67}{2750.14-2637.8}$$

$$= 0.66$$

4.2.4 Perhitungan Daya Turbin

Turbin.perhitungan termodinamika untuk control volume turbin diasumsikan terjadi pada $Q = 0$.

$$\begin{aligned} W_T &= (\dot{m}_1 \cdot h_1) - (\dot{m}_2 \cdot h_2) - (\dot{m}_3 \cdot h_3) - (\dot{m}_4 \cdot h_4) - (\dot{m}_5 \cdot h_5) - (\dot{m}_6 \cdot h_6) - (\dot{m}_7 \cdot h_7) \\ &= (107.95)(3412.4) - (5.736)(3189.4) - (6.891)(3065.6) - (5.83)(2948.4) - (6.35)(2822.5) - (7.11)(2750.1) - (72.95)(2675.6) \\ &= 79101 \frac{kJ}{s} \\ &= 79.101 \text{ MW} \end{aligned}$$

4.2.5. Perhitungan Kerja Pompa

Pada blok diagram di lampiran III terdapat 2 jenis pompa yaitu CP (Condensate Pump) dan BFP (Boiler Feed Pump). Perhitungan termodinamika untuk control volume pompa diasumsikan terjadi pada $Q = 0$. Adapun kerja masing-masing pompa yaitu sebagai berikut :

1. Condensate Pump

$$\begin{aligned} W_{cp} &= \dot{m}_8 (h_9 - h_8) \\ &= 72.95(183.63 - 180.52) \\ &= 226.93 \frac{kJ}{s} \\ &= 0.226 \text{ MW} \end{aligned}$$

2. BFP (Boiler Feed Pump)

$$\begin{aligned} W_{BFP} &= \dot{m}_{12} (h_{13} - h_{12}) \\ &= 108.136 (717.9 - 701.01) \\ &= 1826.41 \frac{kJ}{s} \\ &= 1.826 \text{ MW} \end{aligned}$$

3. Kerja Total Pompa

$$\begin{aligned}
 W_p &= W_{CP} + W_{BFP} \\
 &= 0.226 \text{ MW} + 1.826 \text{ MW} \\
 &= 2.052 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

4.2.6. Perhitungan Panas Yang Masuk

$$\begin{aligned}
 Q_{in} &= \dot{m}_1 (h_1 - h_{15}) \\
 &= 107.95 (3412.4 - 996.3) \\
 &= 260785.6 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\
 &= 260.8 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

4.2.7. Perhitungan Efisiensi Thermal Dan Heat Rate

Unjuk kerja siklus dapat dilihat dari Efisiensi Thermal

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{W_t - W_p}{Q_{in}} \\
 &= \frac{79.101 - 2.052}{260.8} \\
 &= 0.29
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 HR &= \frac{Q_{in}}{W_t - W_p} \\
 &= \frac{260.8}{79.101 - 2.052} \\
 &= 3.38
 \end{aligned}$$

4.2.8 Hasil Perhitungan Isentropis Sebelum dan Sesudah Overhaul

Sebelum	Sesudah
$h_2' = 3096.6 \text{ kJ/kg}$	$h_2' = 3102.9 \text{ kJ/kg}$
$h_3' = 3077.2 \text{ kJ/kg}$	$h_3' = 3052.6 \text{ kJ/kg}$
$h_4' = 2851.0 \text{ kJ/kg}$	$h_4' = 2852.3 \text{ kJ/kg}$
$h_5' = 2764.2 \text{ kJ/kg}$	$h_5' = 2782.3 \text{ kJ/kg}$

$h6' = 2690.0 \text{ kJ/kg}$	$h6' = 2715.6 \text{ kJ/kg}$
$h7' = 2637.8 \text{ kJ/kg}$	$h7' = 2682.03 \text{ kJ/kg}$

4.2.9 Hasil Perhitungan Effisiensi Isentropis

Effisiensi (η) Isentropis (1-2)	0.7	0.701
Effisiensi (η) Isentropis (2-3)	0.87	0.88
Effisiensi (η) Isentropis (3-4)	0.54	0.556
Effisiensi (η) Isentropis (4-5)	0.68	0.8
Effisiensi (η) Isentropis (5-6)	0.55	0.77
Effisiensi (η) Isentropis (6-7)	0.66	0.67

4.2.9 Hasil Perhitungan Unjuk Kerja Sebelum dan Sesudah Overhaul.

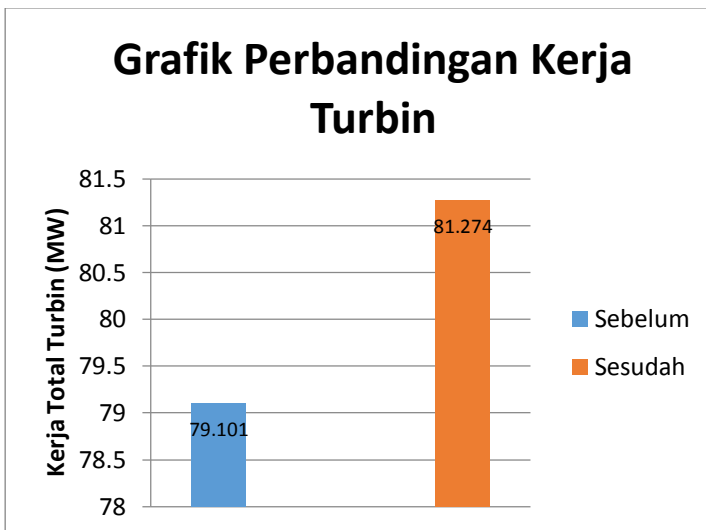
No	Parameter	Satuan	Sebelum	Sesudah
	Main Steam	Press (kPa)	8629.85	8629.25
		Temp ($^{\circ}\text{C}$)	510	510
		Enthalpy (kJ/kg)	3412.4	3412.47
2	Turbine Stage 1	Press (kPa)	3000.8	3079.2
		Temp ($^{\circ}\text{C}$)	233.9	235.2

		Enthalpy (kJ/kg)	3189.4	3195.3
3	Turbine Stage 2	Press (kPa)	1800.5	1836.7
		Temp (°C)	207.1	208.1
		Enthalpy (kJ/kg)	3065.6	3068.9
4	Turbine Stage 3	Press (kPa)	718.82	730.50
		T°C)	166	166.70
		Enthalpy (kJ/kg)	2948.4	2852.3
5	Turbine Stage 4	Press (kPa)	301.06	305.90
		Temp (°C)	133.7	134.2
		Enthalpy (kJ/kg)	2822.52	2782.3
6	Turbine Stage 5	Press (kPa)	84.23	86.2
		Temp (°C)	94.9	95.5
		Enthalpy (kJ/kg)	2750.1	2715.6
7	Condenser in	Press (kPa)	8.66	9.37
		Temp (°C)	-	-
		Enthalpy (kJ/kg)	2675.6	2682.03
8	Condensate pump	Press (kPa)	8.574	9.13
		Temp (°C)	43.1	49.4
		Enthalpy (kJ/kg)	180.52	206.82
9	LP Heater 2	Press (kPa)	3000.8	3079.2
		Temp (°C)	44.3	50.7
		Enthalpy	182.568	209.92
10	LP Heater 1	Press (kPa)	3000.8	3079.2
		Temp (°C)	92.1	92.74
		Enthalpy (kJ/kg)	385.76	388.27

11	Deaerator in	Press (kPa)	3000.8	3079.2
		Temp (°C)	130.9	131.4
		Enthalpy (kJ/kg)	549.7	551.86
12	BFP in	Press (kPa)	-	-
		Temp (°C)	-	-
		Enthalpy (kJ/kg)	701.01	719.02
13	HP Heater 2	Press (kPa)	8629.8	8629.8
		Temp (°C)	168.5	169.3
		Enthalpy (kJ/kg)	717.9	720.9
14	HP Heater 1	Press (kPa)	8629.8	8629.8
		Temp (°C)	204.3	205.3
		Enthalpy (kJ/kg)	871.93	879.4
15	Boiler Feed Water Entry	Press (kPa)	8629.8	8629.8
		Temp (°C)	231.31	232.4
		Enthalpy (kJ/kg)	996.3	1002.4
16	\dot{m}_1	Kg/s	107.95	110.58
17	\dot{m}_2	Kg/s	5.736	6.127
18	\dot{m}_3	Kg/s	6.891	7.330
19	\dot{m}_4	kg/s	5.838	6.19
20	\dot{m}_5	kg/s	6.35	6.67
21	\dot{m}_6	kg/s	7.11	6.66
22	\dot{m}_7	kg/s	72.975	74.58
23	\dot{m}_8	kg/s	72.975	74.58
24	\dot{m}_{12}	kg/s	108.136	110.675

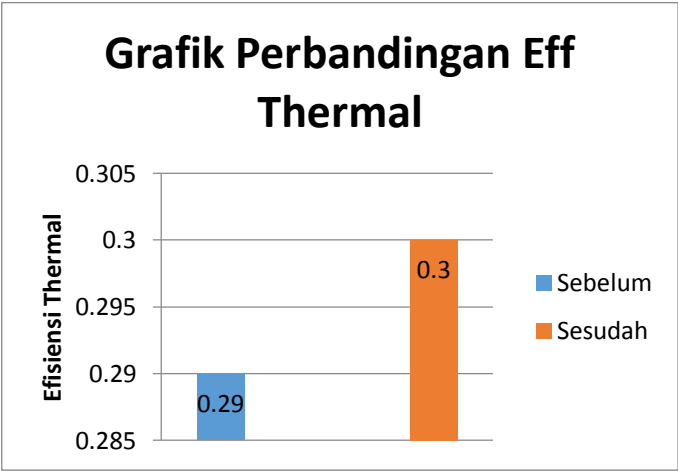
4.2.10 Tabel dan Grafik Unjuk Kerja Siklus Rankine

Hasil Perhitungan	Satuan	Sebelum	Sesudah
Kerja Turbin (Wt)	MW	79.101	81.274
Kerja Pompa (Wp)	MW	2.05	2.13
Panas yang Masuk (Qin)	MW	260.8	266.4
Effisiensi (η)		0.29	0.30
Heat Rate		3.38	3.36

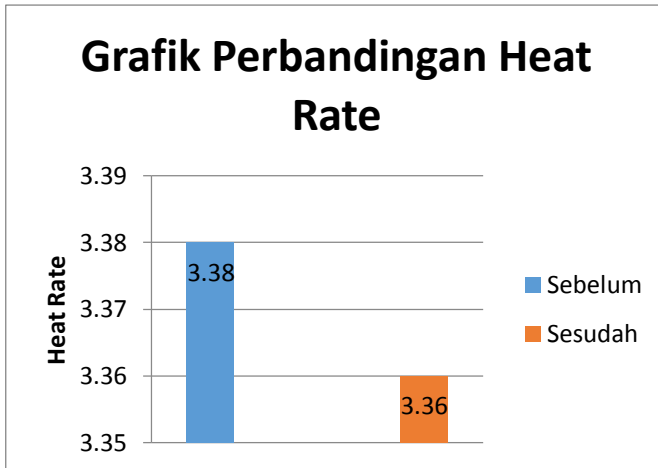


Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Kerja Turbin

Dilihat dari grafik diatas perbandingan kerja turbin sebelum dan sesudah overhaul terjadi kenaikan kerja turbin sebesar 2.173 MW



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Effisiensi
Pada gambar 4.2 grafik menunjukkan kenaikan effisiensi setelah overhaul sebesar 1 %



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Heat Rate

Dilihat dari grafik diatas perbandingan Heat Rate sebelum dan sesudah overhaul terjadi penurunan, hal ini mengkondisikan efisiensi siklus masih bekerja dalam keadaan baik.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN

5.2. Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisis kondisi turbin uap pada PLTGU unit 2 yang di bahas pada bab IV dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain:

1. Turbin uap pada PLTU unit 2 terjadi kenaikan kerja turbin sebelum overhaul 79.101 MW menjadi 81.274 MW setelah overhaul.
2. Kenaikan kerja pompa sebelum overhaul 2.05 MW menjadi 2.13 MW setelah overhaul.
3. Q_{in} sebelum overhaul 260.8 MW naik menjadi 266.4 MW setelah overhaul,
4. Heat rate turun sebesar 0,02 setelah dilakukan overhaul.

5.2. Saran

Berdasarkan proses perhitungan di bab 4 dan analisa, diberikan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, sebagai berikut:

1. Diharapkan untuk lebih dilengkapi data kondisi uap pada titik-titik yang kelengkapan data kurang. Agar untuh hasil perhitungan dalam penelitian selanjutnya bisa lebih akurat.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

1. Borgnakke, Claus dan Richard E Sontag. 2009. *“Fundamentals of Thermodynamics”*. Seventh Edition. John Wiley & Sons Inc. United States of America.
2. El-Wakil, MM. 1984. *“Power Plant Technology”*. First Edition. McGraw-Hill. United States of America.
3. Nag, Dr PK. 2002. *“Power Plant Engineering”*. Second Edition. McGraw-Hill. United States of America.
4. Moran, Michael J dan Howard N Shapiro. 2006. *“Fundamentals of Engineering Thermodynamics”*. Fifth Edition. John Wiley & Sons Inc. United Kingdom.

[illegible]

LAMPIRAN 3 Konversi Satuan

Conversion Factors

Area (A)

$$1 \text{ mm}^2 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ cm}^2 = 1.55 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.1550 \text{ in.}^2$$

$$1 \text{ m}^2 = 10.7639 \text{ ft}^2$$

$$1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in.}^2$$

$$1 \text{ in.}^2 = 6.4516 \text{ cm}^2 = 6.4516 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ ft}^2 = 0.092903 \text{ m}^2$$

Conductivity (k)

$$1 \text{ W/m-K} = 1 \text{ J/s-m-K}$$

$$= 0.577789 \text{ Btu/h-ft-}^\circ\text{R}$$

$$1 \text{ Btu/h-ft-R} = 1.730735 \text{ W/m-K}$$

Density (ρ)

$$1 \text{ kg/m}^3 = 0.06242797 \text{ lbm/ft}^3$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/L}$$

$$1 \text{ lbm/ft}^3 = 16.01846 \text{ kg/m}^3$$

Energy (E, U)

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N-m} = 1 \text{ kg-m}^2/\text{s}^2$$

$$1 \text{ J} = 0.737562 \text{ lbf-ft}$$

$$1 \text{ cal (Int.)} = 4.18681 \text{ J}$$

$$1 \text{ lbf-ft} = 1.355818 \text{ J}$$

$$= 1.28507 \times 10^{-3} \text{ Btu}$$

$$1 \text{ Btu (Int.)} = 1.055056 \text{ kJ}$$

$$= 778.1693 \text{ lbf-ft}$$

$$1 \text{ erg} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Force (F)

$$1 \text{ N} = 0.224809 \text{ lbf}$$

$$1 \text{ kp} = 9.80665 \text{ N (1 kgf)}$$

$$1 \text{ lbf} = 4.448222 \text{ N}$$

Gravitation

$$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$$

$$g = 32.17405 \text{ ft/s}^2$$

Heat capacity (C_p, C_v, C), specific entropy (s)

$$1 \text{ kJ/kg-K} = 0.238846 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{R}$$

$$1 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{R} = 4.1868 \text{ kJ/kg-K}$$

Heat flux (per unit area)

$$1 \text{ W/m}^2 = 0.316998 \text{ Btu/h-ft}^2$$

$$1 \text{ Btu/h-ft}^2 = 3.15459 \text{ W/m}^2$$

LAMPIRAN 4: Tabel Termodinamika Sifat dari Cair Jenuh (Tabel Temperature)

TABLE A-2 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45

LAMPIRAN 5: Tabel Termodinamika Sifat dari Cair Jenuh (Tabel Temperature)

TABLE A-2 (Continued)

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323	200
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585	210
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861	220
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146	230
240	33.44	1.2291	0.05976	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437	240
250	39.73	1.2512	0.05013	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730	250
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6	2.8838	6.0019	260
270	54.99	1.3023	0.03564	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301	270
280	64.12	1.3321	0.03017	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571	280
290	74.36	1.3656	0.02557	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821	290
300	85.81	1.4036	0.02167	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045	300
320	112.7	1.4988	0.01549	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362	320
340	145.9	1.6379	0.01080	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357	340
360	186.5	1.8925	0.006945	1725.2	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526	360
374.14	220.9	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	374.14

Source: Tables A-2 through A-5 are extracted from J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, *Steam Tables*, Wiley, New York, 1969.

LAMPIRAN 6: Tabel Termodinamika Sifat dari Cair Jenuh (Tabel Tekanan)

TABLE A-3 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Pressure Table

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346	0.80
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949	0.90
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594	1.00
1.50	111.4	1.0528	1.159	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233	1.50
2.00	120.2	1.0605	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271	2.00
2.50	127.4	1.0672	0.7187	535.10	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	7.0527	2.50
3.00	133.6	1.0732	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	6.9919	3.00
3.50	138.9	1.0786	0.5243	583.95	2546.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	6.9405	3.50
4.00	143.6	1.0836	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	6.8959	4.00
4.50	147.9	1.0882	0.4140	622.25	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	6.8565	4.50
5.00	151.9	1.0926	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	6.8212	5.00
6.00	158.9	1.1006	0.3157	669.90	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	6.7600	6.00
7.00	165.0	1.1080	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	6.7080	7.00
8.00	170.4	1.1148	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	6.6628	8.00
9.00	175.4	1.1212	0.2150	741.83	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	6.6226	9.00
10.0	179.9	1.1273	0.1944	761.68	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863	10.0
15.0	198.3	1.1539	0.1318	843.16	2594.5	844.84	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448	15.0
20.0	212.4	1.1767	0.09963	906.44	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	6.3409	20.0
25.0	224.0	1.1973	0.07998	959.11	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	6.2575	25.0
30.0	233.9	1.2165	0.06668	1004.8	2604.1	1008.4	1795.7	2804.2	2.6457	6.1869	30.0
35.0	242.6	1.2347	0.05707	1045.4	2603.7	1049.8	1753.7	2803.4	2.7253	6.1253	35.0
40.0	250.4	1.2522	0.04978	1082.3	2602.3	1087.3	1714.1	2801.4	2.7964	6.0701	40.0
45.0	257.5	1.2692	0.04406	1116.2	2600.1	1121.9	1676.4	2798.3	2.8610	6.0199	45.0
50.0	264.0	1.2859	0.03944	1147.8	2597.1	1154.2	1640.1	2794.3	2.9202	5.9734	50.0
60.0	275.6	1.3187	0.03244	1205.4	2589.7	1213.4	1571.0	2784.3	3.0267	5.8892	60.0
70.0	285.9	1.3513	0.02737	1257.6	2580.5	1267.0	1505.1	2772.1	3.1211	5.8133	70.0
80.0	295.1	1.3842	0.02352	1305.6	2569.8	1316.6	1441.3	2758.0	3.2068	5.7432	80.0
90.0	303.4	1.4178	0.02048	1350.5	2557.8	1363.3	1378.9	2742.1	3.2858	5.6772	90.0
100.	311.1	1.4524	0.01803	1393.0	2544.4	1407.6	1317.1	2724.7	3.3596	5.6141	100.
110.	318.2	1.4886	0.01599	1433.7	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	5.5527	110.

LAMPIRAN 7: Tabel Termo Sifat dari Uap Air Superheat

TABLE A-4 Properties of Superheated Water Vapor

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 0.06 \text{ bar} = 0.006 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 36.16^\circ\text{C}$)					$p = 0.35 \text{ bar} = 0.035 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 72.69^\circ\text{C}$)			
Sat.	23.739	2425.0	2567.4	8.3304	4.526	2473.0	2631.4	7.7158
80	27.132	2487.3	2650.1	8.5804	4.625	2483.7	2645.6	7.7564
120	30.219	2544.7	2726.0	8.7840	5.163	2542.4	2723.1	7.9644
160	33.302	2602.7	2802.5	8.9693	5.696	2601.2	2800.6	8.1519
200	36.383	2661.4	2879.7	9.1398	6.228	2660.4	2878.4	8.3237
240	39.462	2721.0	2957.8	9.2982	6.758	2720.3	2956.8	8.4828
280	42.540	2781.5	3036.8	9.4464	7.287	2780.9	3036.0	8.6314
320	45.618	2843.0	3116.7	9.5859	7.815	2842.5	3116.1	8.7712
360	48.696	2905.5	3197.7	9.7180	8.344	2905.1	3197.1	8.9034
400	51.774	2969.0	3279.6	9.8435	8.872	2968.6	3279.2	9.0291
440	54.851	3033.5	3362.6	9.9633	9.400	3033.2	3362.2	9.1490
500	59.467	3132.3	3489.1	10.1336	10.192	3132.1	3488.8	9.3194
$p = 0.70 \text{ bar} = 0.07 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 89.95^\circ\text{C}$)					$p = 1.0 \text{ bar} = 0.10 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 99.63^\circ\text{C}$)			
Sat.	2.365	2494.5	2660.0	7.4797	1.694	2506.1	2675.5	7.3594
100	2.434	2509.7	2680.0	7.5341	1.696	2506.7	2676.2	7.3614
120	2.571	2539.7	2719.6	7.6375	1.793	2537.3	2716.6	7.4668
160	2.841	2599.4	2798.2	7.8279	1.984	2597.8	2796.2	7.6597
200	3.108	2659.1	2876.7	8.0012	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
240	3.374	2719.3	2955.5	8.1611	2.359	2718.5	2954.5	7.9949
280	3.640	2780.2	3035.0	8.3162	2.546	2779.6	3034.2	8.1445
320	3.905	2842.0	3115.3	8.4504	2.732	2841.5	3114.6	8.2849
360	4.170	2904.6	3196.5	8.5828	2.917	2904.2	3195.9	8.4175
400	4.434	2968.2	3278.6	8.7086	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
440	4.698	3032.9	3361.8	8.8286	3.288	3032.6	3361.4	8.6636
500	5.095	3131.8	3488.5	8.9991	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
$p = 1.5 \text{ bar} = 0.15 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 111.37^\circ\text{C}$)					$p = 3.0 \text{ bar} = 0.30 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 133.55^\circ\text{C}$)			
Sat.	1.159	2519.7	2693.6	7.2233	0.606	2543.6	2725.3	6.9919
120	1.188	2533.3	2711.4	7.2693				
160	1.317	2595.2	2792.8	7.4665	0.651	2587.1	2782.3	7.1276
200	1.444	2656.2	2872.9	7.6433	0.716	2650.7	2865.5	7.3115
240	1.570	2717.2	2952.7	7.8052	0.781	2713.1	2947.3	7.4774
280	1.695	2778.6	3032.8	7.9555	0.844	2775.4	3028.6	7.6299
320	1.819	2840.6	3113.5	8.0964	0.907	2838.1	3110.1	7.7722
360	1.943	2903.5	3195.0	8.2293	0.969	2901.4	3192.2	7.9061
400	2.067	2967.3	3277.4	8.3555	1.032	2965.6	3275.0	8.0330
440	2.191	3032.1	3360.7	8.4757	1.094	3030.6	3358.7	8.1538
500	2.376	3131.2	3487.6	8.6466	1.187	3130.0	3486.0	8.3251
600	2.685	3301.7	3704.3	8.9101	1.341	3300.8	3703.2	8.5892

LAMPIRAN 8: Tabel Termo Sifat dari Uap Air Superheat

TABLE A-4 (Continued)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 5.0 \text{ bar} = 0.50 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 151.86^\circ\text{C}$)					$p = 7.0 \text{ bar} = 0.70 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 164.97^\circ\text{C}$)			
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.2729	2572.5	2763.5	6.7080
180	0.4045	2609.7	2812.0	6.9656	0.2847	2599.8	2799.1	6.7880
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.2999	2634.8	2844.8	6.8865
240	0.4646	2707.6	2939.9	7.2307	0.3292	2701.8	2932.2	7.0641
280	0.5034	2771.2	3022.9	7.3865	0.3574	2766.9	3017.1	7.2233
320	0.5416	2834.7	3105.6	7.5308	0.3852	2831.3	3100.9	7.3697
360	0.5796	2898.7	3188.4	7.6660	0.4126	2895.8	3184.7	7.5063
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.4397	2960.9	3268.7	7.6350
440	0.6548	3028.6	3356.0	7.9152	0.4667	3026.6	3353.3	7.7571
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873	0.5070	3126.8	3481.7	7.9299
600	0.8041	3299.6	3701.7	8.3522	0.5738	3298.5	3700.2	8.1956
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.6403	3476.6	3924.8	8.4391
$p = 10.0 \text{ bar} = 1.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 179.91^\circ\text{C}$)					$p = 15.0 \text{ bar} = 1.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 198.32^\circ\text{C}$)			
Sat.	0.1944	2583.6	2778.1	6.5865	0.1318	2594.5	2792.2	6.4448
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.1325	2598.1	2796.8	6.4546
240	0.2275	2692.9	2920.4	6.8817	0.1483	2676.9	2899.3	6.6628
280	0.2480	2760.2	3008.2	7.0465	0.1627	2748.6	2992.7	6.8381
320	0.2678	2826.1	3093.9	7.1962	0.1765	2817.1	3081.9	6.9938
360	0.2873	2891.6	3178.9	7.3349	0.1899	2884.4	3169.2	7.1363
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2030	2951.3	3255.8	7.2690
440	0.3257	3023.6	3349.3	7.5883	0.2160	3018.5	3342.5	7.3940
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2352	3120.3	3473.1	7.5698
540	0.3729	3192.6	3565.6	7.8720	0.2478	3189.1	3560.9	7.6805
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.2668	3293.9	3694.0	7.8385
640	0.4198	3367.4	3787.2	8.1290	0.2793	3364.8	3783.8	7.9391
$p = 20.0 \text{ bar} = 2.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 212.42^\circ\text{C}$)					$p = 30.0 \text{ bar} = 3.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 233.90^\circ\text{C}$)			
Sat.	0.0996	2600.3	2799.5	6.3409	0.0667	2604.1	2804.2	6.1869
240	0.1085	2659.6	2876.5	6.4952	0.0682	2619.7	2824.3	6.2265
280	0.1200	2736.4	2976.4	6.6828	0.0771	2709.9	2941.3	6.4462
320	0.1308	2807.9	3069.5	6.8452	0.0850	2788.4	3043.4	6.6245
360	0.1411	2877.0	3159.3	6.9917	0.0923	2861.7	3138.7	6.7801
400	0.1512	2945.2	3247.6	7.1271	0.0994	2932.8	3230.9	6.9212
440	0.1611	3013.4	3335.5	7.2540	0.1062	3002.9	3321.5	7.0520
500	0.1757	3116.2	3467.6	7.4317	0.1162	3108.0	3456.5	7.2338
540	0.1853	3185.6	3556.1	7.5434	0.1227	3178.4	3546.6	7.3474
600	0.1996	3290.9	3690.1	7.7024	0.1324	3285.0	3682.3	7.5085
640	0.2091	3362.2	3780.4	7.8035	0.1388	3357.0	3773.5	7.6106
700	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487	0.1484	3466.5	3911.7	7.7571

LAMPIRAN 9: Tabel Termo Sifat dari Uap Air Superheat

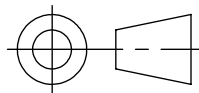
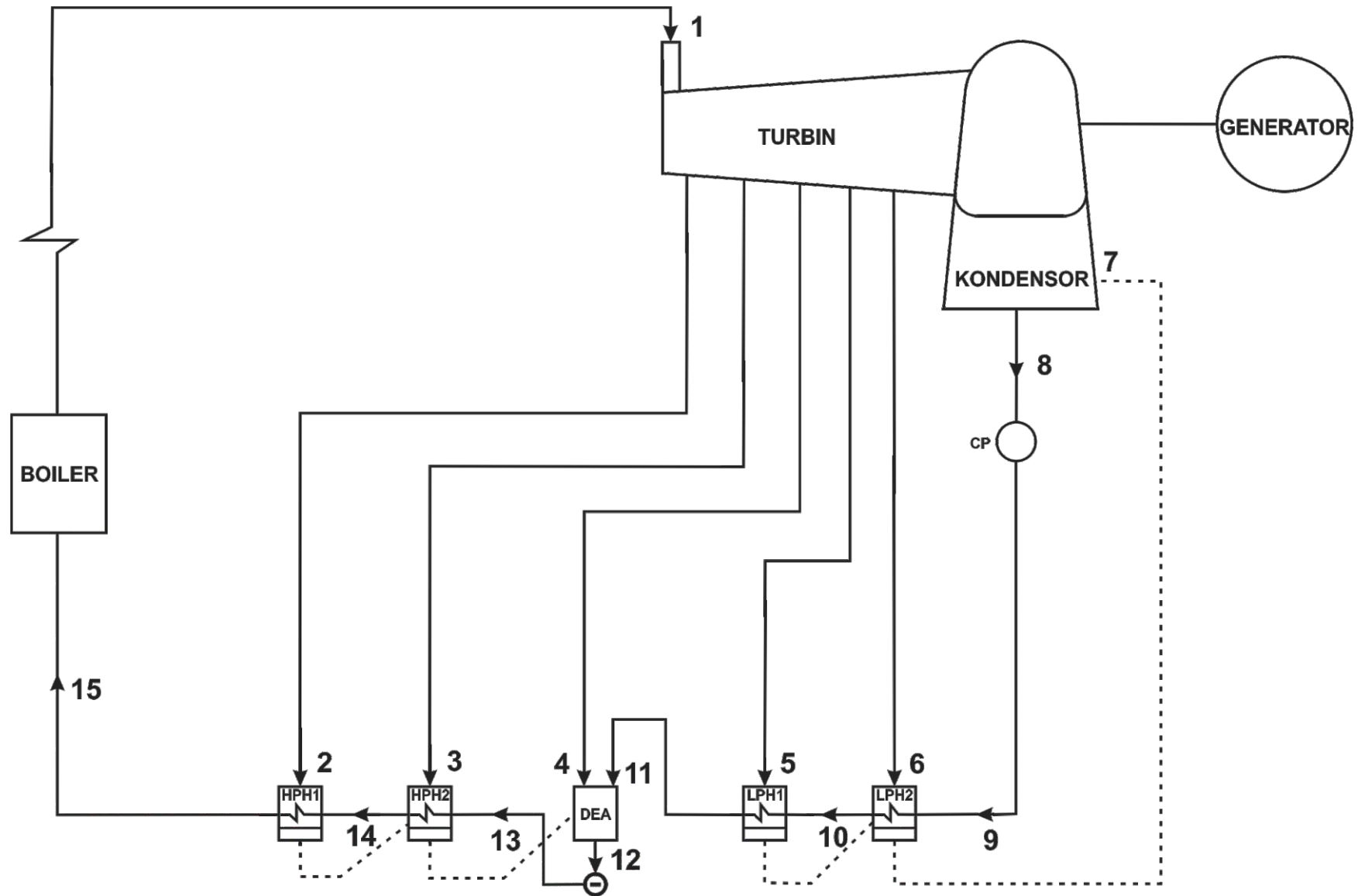
TABLE A-4 (Continued)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 40 \text{ bar} = 4.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 250.4^\circ\text{C}$)					$p = 60 \text{ bar} = 6.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 275.64^\circ\text{C}$)			
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892
280	0.05546	2680.0	2901.8	6.2568	0.03317	2605.2	2804.2	5.9252
320	0.06199	2767.4	3015.4	6.4553	0.03876	2720.0	2952.6	6.1846
360	0.06788	2845.7	3117.2	6.6215	0.04331	2811.2	3071.1	6.3782
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408
440	0.07872	2992.2	3307.1	6.9041	0.05122	2970.0	3277.3	6.6853
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803
540	0.09145	3171.1	3536.9	7.2056	0.06015	3156.1	3517.0	6.9999
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677
640	0.1037	3351.8	3766.6	7.4720	0.06859	3341.0	3752.6	7.2731
700	0.1110	3462.1	3905.9	7.6198	0.07352	3453.1	3894.1	7.4234
740	0.1157	3536.6	3999.6	7.7141	0.07677	3528.3	3989.2	7.5190
$p = 80 \text{ bar} = 8.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 295.06^\circ\text{C}$)					$p = 100 \text{ bar} = 10.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C}$)			
Sat.	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432	0.01803	2544.4	2724.7	5.6141
320	0.02682	2662.7	2877.2	5.9489	0.01925	2588.8	2781.3	5.7103
360	0.03089	2772.7	3019.8	6.1819	0.02331	2729.1	2962.1	6.0060
400	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120
440	0.03742	2946.7	3246.1	6.5190	0.02911	2922.1	3213.2	6.3805
480	0.04034	3025.7	3348.4	6.6586	0.03160	3005.4	3321.4	6.5282
520	0.04313	3102.7	3447.7	6.7871	0.03394	3085.6	3425.1	6.6622
560	0.04582	3178.7	3545.3	6.9072	0.03619	3164.1	3526.0	6.7864
600	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029
640	0.05102	3330.1	3738.3	7.1283	0.04048	3318.9	3723.7	7.0131
700	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687
740	0.05729	3520.4	3978.7	7.3782	0.04560	3512.1	3968.1	7.2670
$p = 120 \text{ bar} = 12.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 324.75^\circ\text{C}$)					$p = 140 \text{ bar} = 14.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 336.75^\circ\text{C}$)			
Sat.	0.01426	2513.7	2684.9	5.4924	0.01149	2476.8	2637.6	5.3717
360	0.01811	2678.4	2895.7	5.8361	0.01422	2617.4	2816.5	5.6602
400	0.02108	2798.3	3051.3	6.0747	0.01722	2760.9	3001.9	5.9448
440	0.02355	2896.1	3178.7	6.2586	0.01954	2868.6	3142.2	6.1474
480	0.02576	2984.4	3293.5	6.4154	0.02157	2962.5	3264.5	6.3143
520	0.02781	3068.0	3401.8	6.5555	0.02343	3049.8	3377.8	6.4610
560	0.02977	3149.0	3506.2	6.6840	0.02517	3133.6	3486.0	6.5941
600	0.03164	3228.7	3608.3	6.8037	0.02683	3215.4	3591.1	6.7172
640	0.03345	3307.5	3709.0	6.9164	0.02843	3296.0	3694.1	6.8326
700	0.03610	3425.2	3858.4	7.0749	0.03075	3415.7	3846.2	6.9939
740	0.03781	3503.7	3957.4	7.1746	0.03225	3495.2	3946.7	7.0952

LAMPIRAN 10: Tabel Termo Sifat dari Cair (Air) Terkompresi

TABLE A-5 Properties of Compressed Liquid Water

T °C	$v \times 10^3$ m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	$v \times 10^3$ m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 25 \text{ bar} = 2.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 223.99^\circ\text{C}$)					$p = 50 \text{ bar} = 5.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 263.99^\circ\text{C}$)			
20	1.0006	83.80	86.30	.2961	.9995	83.65	88.65	.2956
40	1.0067	167.25	169.77	.5715	1.0056	166.95	171.97	.5705
80	1.0280	334.29	336.86	1.0737	1.0268	333.72	338.85	1.0720
100	1.0423	418.24	420.85	1.3050	1.0410	417.52	422.72	1.3030
140	1.0784	587.82	590.52	1.7369	1.0768	586.76	592.15	1.7343
180	1.1261	761.16	763.97	2.1375	1.1240	759.63	765.25	2.1341
200	1.1555	849.9	852.8	2.3294	1.1530	848.1	853.9	2.3255
220	1.1898	940.7	943.7	2.5174	1.1866	938.4	944.4	2.5128
Sat.	1.1973	959.1	962.1	2.5546	1.2859	1147.8	1154.2	2.9202
$p = 75 \text{ bar} = 7.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 290.59^\circ\text{C}$)					$p = 100 \text{ bar} = 10.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C}$)			
20	.9984	83.50	90.99	.2950	.9972	83.36	93.33	.2945
40	1.0045	166.64	174.18	.5696	1.0034	166.35	176.38	.5686
80	1.0256	333.15	340.84	1.0704	1.0245	332.59	342.83	1.0688
100	1.0397	416.81	424.62	1.3011	1.0385	416.12	426.50	1.2992
140	1.0752	585.72	593.78	1.7317	1.0737	584.68	595.42	1.7292
180	1.1219	758.13	766.55	2.1308	1.1199	756.65	767.84	2.1275
220	1.1835	936.2	945.1	2.5083	1.1805	934.1	945.9	2.5039
260	1.2696	1124.4	1134.0	2.8763	1.2645	1121.1	1133.7	2.8699
Sat.	1.3677	1282.0	1292.2	3.1649	1.4524	1393.0	1407.6	3.3596
$p = 150 \text{ bar} = 15.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 342.24^\circ\text{C}$)					$p = 200 \text{ bar} = 20.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 365.81^\circ\text{C}$)			
20	.9950	83.06	97.99	.2934	.9928	82.77	102.62	.2923
40	1.0013	165.76	180.78	.5666	.9992	165.17	185.16	.5646
80	1.0222	331.48	346.81	1.0656	1.0199	330.40	350.80	1.0624
100	1.0361	414.74	430.28	1.2955	1.0337	413.39	434.06	1.2917
140	1.0707	582.66	598.72	1.7242	1.0678	580.69	602.04	1.7193
180	1.1159	753.76	770.50	2.1210	1.1120	750.95	773.20	2.1147
220	1.1748	929.9	947.5	2.4953	1.1693	925.9	949.3	2.4870
260	1.2550	1114.6	1133.4	2.8576	1.2462	1108.6	1133.5	2.8459
300	1.3770	1316.6	1337.3	3.2260	1.3596	1306.1	1333.3	3.2071
Sat.	1.6581	1585.6	1610.5	3.6848	2.036	1785.6	1826.3	4.0139
$p = 250 \text{ bar} = 25 \text{ MPa}$					$p = 300 \text{ bar} = 30.0 \text{ MPa}$			
20	.9907	82.47	107.24	.2911	.9886	82.17	111.84	.2899
40	.9971	164.60	189.52	.5626	.9951	164.04	193.89	.5607
100	1.0313	412.08	437.85	1.2881	1.0290	410.78	441.66	1.2844
200	1.1344	834.5	862.8	2.2961	1.1302	831.4	865.3	2.2893
300	1.3442	1296.6	1330.2	3.1900	1.3304	1287.9	1327.8	3.1741



SKALA :1:1
SATUAN :mm
TANGGAL:19-6-2017

DIGAMBAR:ANITA VIZENZA F.N.
NRP :2114030094
DILIHAT :Ir. JOKO SARSETYANTO, MT.

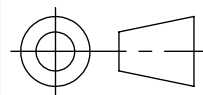
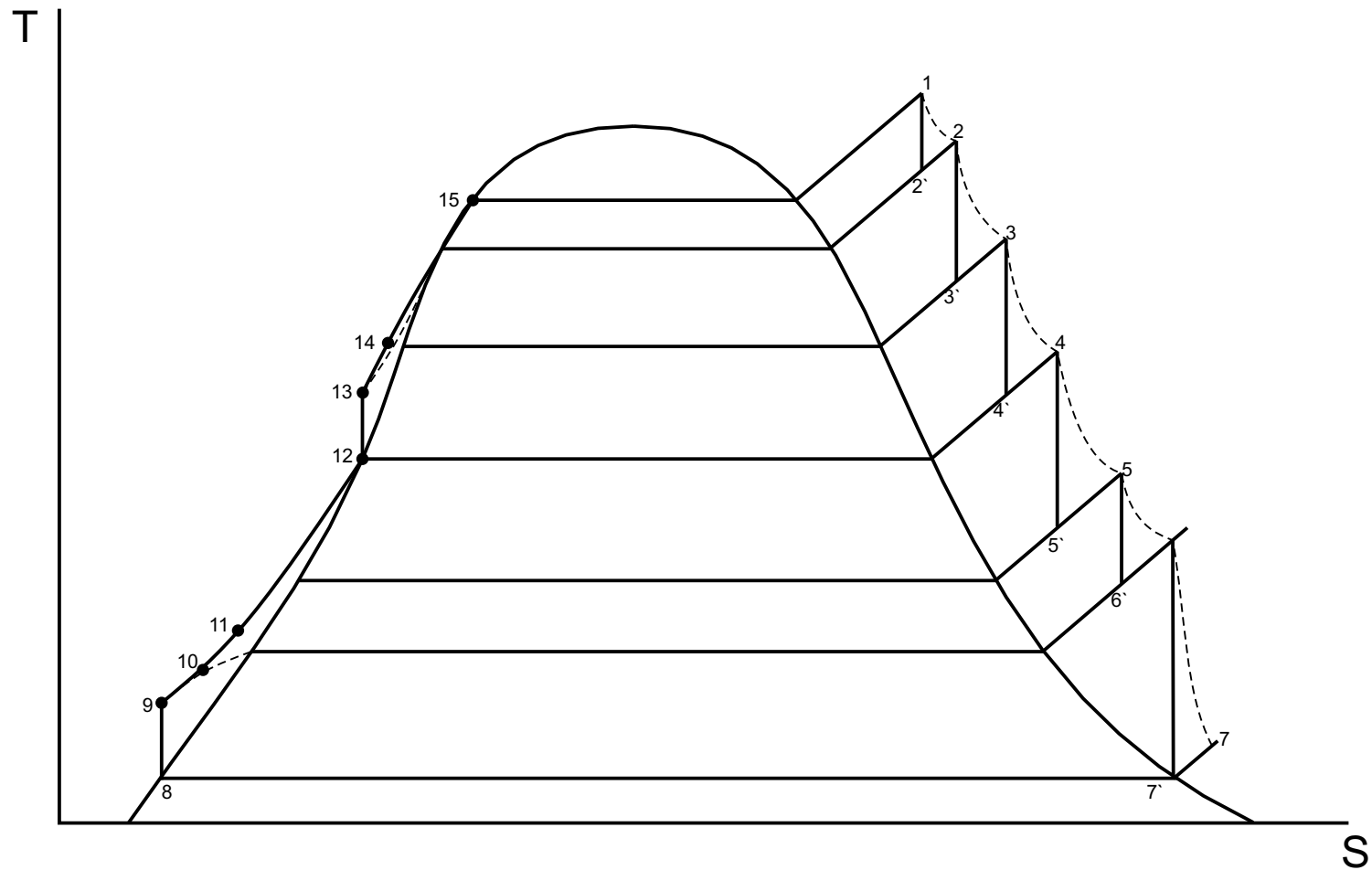
PERINGATAN:

D3 TEKNIK MESIN
ITS

Blok Diagram Mass & Heat Balance
PLTU Unit 2 PT. PJB UP Gresik

NO. 1

A4



SKALA : 1:1
SATUAN : mm
TANGGAL: 11-7-2017

DIGAMBAR: ANITA VIZENZA F.N.
NRP : 2114030094
DILIHAT : Ir. JOKO SARSETYANTO, MT.

PERINGATAN:

D3 TEKNIK MESIN
ITS

T-S Diagram Siklus Rankine PLTU Unit 2
PT. PJB UP Gresik

NO. 2

A4

BIODATA PENULIS



Penulis tugas akhir ini bernama Anita Vizenza FN. Tugas Akhir ini diselesaikan sebagai persyaratan untuk kelulusan Departemen Teknik Mesin Industri ITS. Penulis dilahirkan di Surabaya, 14 Maret 1996, merupakan anak terakhir dari lima bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu TK Fajar Jaya Surabaya, SDN Gubeng 1 Surabaya, SMP Negeri 29 Surabaya, dan SMA Negeri 22 Surabaya. Pada tahun 2014 Penulis diterima di Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi dan terdaftar

sebagai mahasiswa dengan NRP 2114 030 094. Penulis mengambil bidang Konversi Energi dan mengambil tugas akhir di bidang yang sama. Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan dan bergabung dalam organisasi. Organisasi yang pernah diikutinya antara lain : Staff Hubungan Mahasiswa D-III Teknik Mesin FTI-ITS tahun 2015-2016, Bendahara Basudewo Ethanol Team tahun 2016-2017. PT. PJB UP GRESIK merupakan tempat pengambilan data TA penulis di PLTU unit 2.

Untuk mengetahui informasi tentang penulis dapat melalui email: anitavizenzafn@gmail.com.